

文章编号:1673-2049(2016)05-0014-08

沈海高速公路辽宁段沿线桥梁混凝土碳化概率特征研究

贡金鑫¹,王振吉^{1,2,3},马丽娜¹,赵艳华¹,彭建⁴

(1. 大连理工大学 建设工程学部,辽宁 大连 116024; 2. 辽宁大通公路工程有限公司,辽宁 沈阳 110005;
3. 辽宁省交通规划设计院公路养护技术研发中心,辽宁 沈阳 110111;
4. 辽宁省高速公路管理局,辽宁 沈阳 110003)

摘要:对沈海(沈阳—海口)高速公路辽宁段沿线混凝土桥梁的碳化实测数据进行了统计分析,建立了以混凝土抗压强度和时间为主要参数的不同地区桥梁和单个桥梁混凝土碳化深度的随机过程模型。将混凝土碳化到钢筋表面的状态作为大气环境中的耐久性极限状态,分析了沿线上海湾大桥不同服役时间的耐久性失效概率。结果表明:混凝土碳化深度随混凝土抗压强度的增大而减小,但受多种复杂因素影响,混凝土碳化深度离散性很大;混凝土碳化系数计算模型的不确定性系数服从对数正态分布;海湾大桥混凝土使用到第 100 年时的耐久性失效概率小于 10%。

关键词:混凝土桥梁;混凝土碳化;概率模型;高速公路;离散性

中图分类号:U444

文献标志码:A

Study on Probability Characteristics of Concrete Carbonation for Bridges of Shenyang-Haikou Highway in Section of Liaoning Province

GONG Jin-xin¹, WANG Zhen-ji^{1,2,3}, MA Li-na¹, ZHAO Yan-hua¹, PENG Jian⁴

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;
2. Liaoning Datong Road Construction Co., Ltd., Shenyang 110005, Liaoning, China; 3. Liaoning Provincial Communication Planning & Design Institute Research Centre of Road Maintenance Technologies, Shenyang 110111, Liaoning, China; 4. Liaoning Expressway Administration, Shenyang 110003, Liaoning, China)

Abstract: Statistical analysis for concrete carbonation data acquired from bridges on Shenhai (Shenyang-Haikou) highway in section of Liaoning province was carried out, and stochastic process models regarding compressive strength of concrete and time as main parameters for bridges in different regions and individual bridge were developed. Taking the state of concrete carbonization to the surface of the reinforcement as the assumed durability limit state in the atmospheric environment, the durability failure probabilities of Haiwan bridge under different service time were analyzed. The results show that the carbonation depth of concrete decreases with increase of the compressive strength of concrete, but the carbonation depth has large discreteness due to various complex factors. The model uncertainty of concrete carbonation coefficient follows logarithmic normal distribution. The durability failure probability of Haiwan

收稿日期:2016-05-14

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2015CB057703);辽宁省交通科技项目(201512);交通运输部建设科技项目(2013 318 223 040,2014 318 494 020)

作者简介:贡金鑫(1964-),男,河北衡水人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jinxingong@163.com。

bridge is less than 10% at expire time of 100 years.

Key words: concrete bridge; concrete carbonation; probability model; highway; discreteness

0 引言

混凝土碳化是大气中的二氧化碳进入混凝土孔隙,与孔隙水形成碳酸并与混凝土中的碱物质发生中和反应,降低混凝土碱性的过程。碱性的降低使混凝土失去了对钢筋钝化膜的保护能力,可诱发混凝土结构中钢筋锈蚀,而锈蚀产物膨胀会引起混凝土保护层开裂甚至剥落,对混凝土结构的耐久性具有很大的影响。因此,研究和建立混凝土碳化深度的预测模型对评价混凝土结构的耐久性寿命具有重要意义。

根据确定碳化模型中碳化系数方法的不同,混凝土碳化模型可分为根据室内试验建立的理论模型和基于工程实测数据建立的实用模型^[1]。理论模型是以混凝土组成和环境为影响参数的模型,如肖佳等^[2]、龚洛书等^[3]和许丽萍等^[4]考虑不同材料的模型,陈树亮^[5]综合考虑不同材料、环境及保护层厚度的模型,牛荻涛等^[6-8]考虑不同矿物掺和料的模型;实用模型是以混凝土抗压强度为影响参数的模型^[9-10]。此外,部分学者^[11-13]研究了混凝土在不同应力状态下的碳化规律,建立了多因素耦合作用下混凝土的碳化模型。理论模型的优点在于模型中各参数的物理意义明确,但由于考虑因素较多,实际应用中有些参数很难确定,因此不便于工程应用^[14];另外,实验室条件往往与实际结构的现场条件差别很大,预测结果误差较大。根据实际工程数据建立的实用模型综合反映了结构所处环境条件、材料性能、结构施工因素、养护因素及其他多种难以单独考虑的各种复杂因素的影响^[15],虽然离散性比较大,但能够反映实际情况,具有较好的实用性^[16]。

本文对沈海高速公路辽宁省境内沈大(沈阳—大连)段沿线桥梁的混凝土碳化特征进行了统计分析。沈大段高速公路全长 348 km,沿线共 455 座桥梁,其中沈阳段 6 座,辽阳段 32 座,鞍山段 63 座,营口段 138 座,大连段 216 座。目前,沈大段高速公路已运营 25 年,辽宁省高速公路管理局分别于 2011 年,2012 年,2013 年对沿线桥梁进行了 3 次检测。本文对混凝土碳化深度检测结果进行了统计分析,将不同地区的公路段视为不同的环境条件,建立了不同公路段桥梁的混凝土碳化预测模型。另外,也建立了沿线数据比较多的海湾大桥碳化概率模型,

并计算了不同服役时间的碳化失效概率。

1 沿线不同地区桥梁混凝土碳化模型

1.1 混凝土碳化模型

目前,各国学者已经对混凝土的碳化进行了大量研究,一般认为混凝土碳化深度可采用 Fick 第一定律描述,即

$$x_c = k_c \sqrt{t} \quad (1)$$

式中: x_c 为混凝土碳化深度; k_c 为混凝土碳化系数; t 为混凝土碳化时间。

混凝土碳化系数体现了混凝土的抗碳化能力,与灰灰比、水泥品种和用量、环境因素、养护方法等有关。

式(1)明确了混凝土碳化深度与混凝土碳化时间的关系。混凝土碳化时间一般从结构竣工算起,本文根据桥梁现场测得的混凝土抗压强度和碳化深度确定碳化系数。

1.2 现场混凝土强度和碳化深度的实测

本文混凝土强度和碳化深度数据来自于沈海高速公路沈大段沿线桥梁的检测资料,由辽宁省交通规划设计院检测中心提供。混凝土抗压强度和碳化深度按照《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23—2011)^[17]进行测量,并结合混凝土碳化情况对混凝土抗压强度测量结果进行修正。混凝土强度直接反映了混凝土的强度等级、混凝土的制作和施工质量,间接反映了混凝土的抗渗透性,因此与混凝土的碳化系数 k_c 有密切关系。

假定某地区第 k 座桥梁的第 i 个构件在第 j ($j=1,2,3$) 次检测的时间为 $t_{k,ij}$,测得的混凝土强度为 $f_{ck,ij}$,混凝土碳化深度为 $x_{ck,ij}$,则根据式(1)得对应的混凝土碳化系数 $k_{ck,ij}$ 为

$$k_{ck,ij} = \frac{x_{ck,ij}}{\sqrt{t_{k,ij}}} \quad (2)$$

为建立混凝土碳化系数 k_c 与混凝土抗压强度 f_c 的关系,将一个地区视为相同的环境,将由式(2)计算的同一地区不同桥梁、不同构件、不同检测时间的混凝土碳化系数视为一个母体进行统计分析。

1.3 混凝土碳化系数的确定

目前,各国学者已经提出了多个混凝土碳化系数与混凝土抗压强度关系的数学模型。根据离散图的趋势,并参考文献[18]模型和文献[19]模型的形

式,采用下面 4 个模型描述混凝土碳化系数与混凝土抗压强度的关系,即

$$k_c=a\exp(-bf_c) \tag{3}$$

$$k_c=\frac{a}{\sqrt{f_c}+b}-d \tag{4}$$

$$k_c=\frac{a}{f_c+b}-d \tag{5}$$

$$k_c=\frac{a}{f_c^2+b}-d \tag{6}$$

式中: a, b, d 均为通过回归分析确定的参数。

图 1 为计算得到的混凝土碳化系数 k_c 与混凝土抗压强度 f_c 的关系。由图 1 可以看出,混凝土碳化系数与混凝土抗压强度之间呈非线性降低关系,这与以往的分析结果是一致的。离散性较大反映了影响混凝土碳化因素的复杂性。

利用图 1 中混凝土碳化系数与混凝土抗压强度的数据点对式(3)~(6)中的参数 a, b, d 进行回归分析,结果如表 1 所示。由图 1 还可以看出,大连段和营口段的 4 条拟合曲线比较接近,其他地区的曲线相互之间有一定偏离,但差别不大。

式(3)~(6)反映了混凝土碳化系数受混凝土材料(抗压强度)和桥梁所处环境的影响。表 2 为沈海高速公路沈大段沿线 5 个地区的气候、气象和水文条件(二氧化碳浓度未能得到),可以看出 5 个地区自然条件相差不是很大。一般情况下,温度高时混凝土碳化速度快;相对湿度为 50%~60%时碳化速度最快,因为相对湿度低时混凝土内碳化反应受到限制,相对湿度高时二氧化碳进入混凝土毛细管的通道被阻塞。图 2 给出了根据式(4)确定的碳化系数公式计算的碳化系数与混凝土抗压强度的关系,当混凝土抗压强度小于 40 MPa 时,沈阳地区的碳化系数与其他 4 个地区偏离较大,这可能与沈阳地区的实测数据较少、确定的碳化系数不是很准确有关。

将实测的混凝土碳化深度 x_m 与按式(3)~(6)计算得到的碳化深度 x_c 的比值定义为混凝土碳化系数计算模型的不确定系数 k_p ,即

$$k_p=\frac{x_m}{x_c} \tag{7}$$

系数 k_p 反映了用式(3)~(6)确定的碳化系数 k_c 的准确程度。如果 $k_p=1$,则计算结果与实测结果是完全一致的,但由图 1 可以看出,对于每一地区,可以计算得到多个 k_p ,因此,需要将 k_p 视为随机变量。

按式(3)~(6)分析得到的不同地区桥梁混凝土

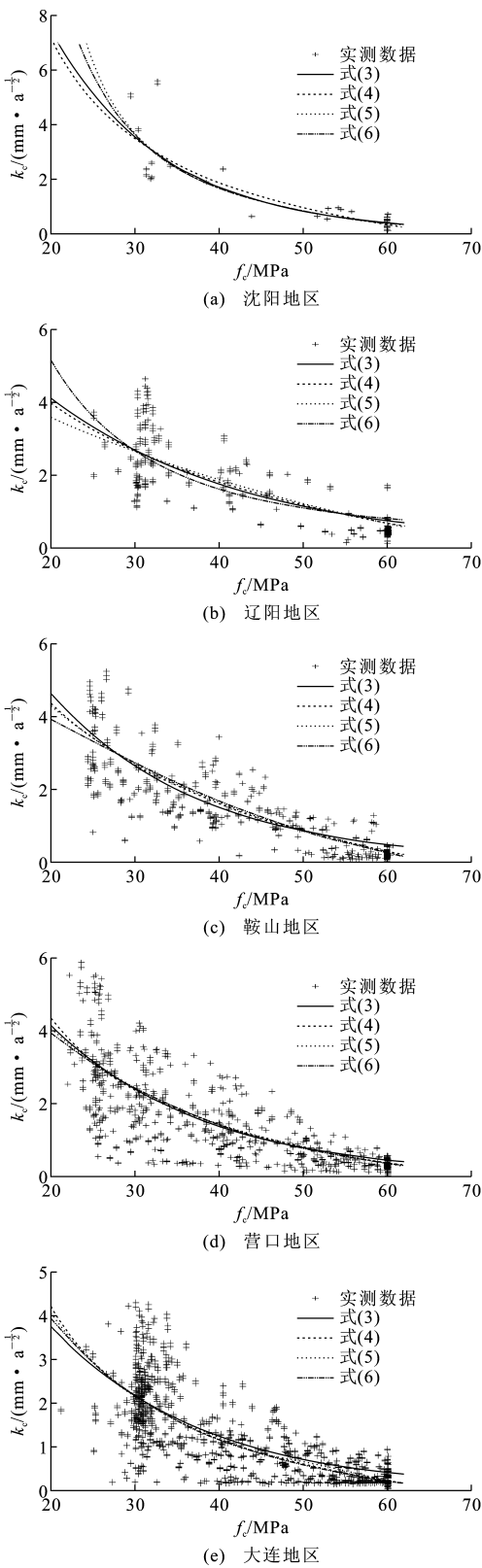


图 1 不同地区桥梁混凝土碳化系数与抗压强度的关系

Fig. 1 Relations of Concrete Carbonation Coefficient and Compression Strength of Concrete of Bridges in Different Regions

表 1 不同地区桥梁混凝土碳化系数公式的拟合参数

Tab. 1 Fitted Parameters of Concrete Carbonation Coefficient Formulas of Bridges in Different Regions						
公式编号	拟合参数	沈阳地区	辽阳地区	鞍山地区	营口地区	大连地区
(3)	a	32.419	9.641	14.197	12.480	11.242
	b	0.074	0.043	0.056	0.055	0.055
(4)	a	21.419	70.905	59.236	19.089	15.167
	b	-2.508	2.450	1.005	-1.814	-2.222
	d	3.752	6.274	6.456	2.832	2.515
(5)	a	67.167	945.193	342.852	177.900	116.117
	b	-15.967	75.662	21.872	8.079	0.080
	d	1.133	6.298	3.899	2.262	1.707
(6)	a	3 357.385	2 568.217	11 826.28	5 151.39	3 764.559
	b	-99.414	109.387	1594.297	678.764	410.404
	d	0.565	-0.115	2.010	0.842	0.703

表 2 不同地区的自然条件

Tab. 2 Natural Conditions of Different Regions					
地区	沈阳地区	辽阳地区	鞍山地区	营口地区	大连地区
气候	温带季风气候	温带湿润性季风气候	温带季风性气候	暖温带大陆性季风气候	海洋性特点的暖温带大陆性季风气候
年平均气温/℃	6.2~9.7	6.0~9.0	8.0~9.0	7.0~9.5	10.5
年降雨量/mm	600~800	600~900	640~880	670~800	550~950
相对湿度/%	68~78		52~67	≥ 65	56~79

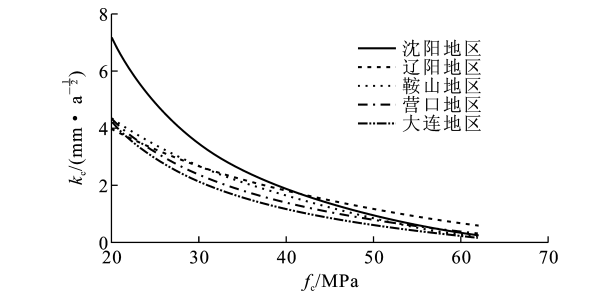


图 2 按式(4)确定的不同地区桥梁混凝土碳化系数曲线
Fig. 2 Concrete Carbonation Coefficient Curves of Bridges in Different Regions by Eq. (4)

根据上述分析结果,得到沈大段高速公路沿线不同地区桥梁混凝土碳化深度的随机过程模型,即

$$x_c = k_p k_c \sqrt{t} = k_p \left(\frac{a}{\sqrt{f_c + b}} - d \right) \sqrt{t} \quad (8)$$

k_p 概率密度函数为

$$f(k_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\ln(k_p)} k_p} \exp \left[-\frac{(\ln(k_p) - \mu_{\ln(k_p)})^2}{2\sigma_{\ln(k_p)}^2} \right] \quad (9)$$
$$\mu_{\ln(k_p)} = \ln \left(\frac{\mu_{k_p}}{\sqrt{1 + \delta_{k_p}^2}} \right) \quad (10)$$
$$\sigma_{\ln(k_p)} = \sqrt{\ln(1 + \delta_{k_p}^2)} \quad (11)$$

式中: $\mu_{\ln(k_p)}$ 、 $\sigma_{\ln(k_p)}$ 分别为 k_p 的对数平均值和标准

碳化系数计算模型不确定系数 k_p 的平均值 μ_{k_p} 、标准差 σ_{k_p} 和变异系数 δ_{k_p} 如表 3 所示。如果计算模型不确定系数 k_p 的平均值接近于 1,同时变异系数越小,说明公式的预测精度越高。由表 3 可以看出,各地区不同公式的计算模型不确定系数的统计参数非常接近。

图 3 为按式(4)确定的各地区桥梁混凝土碳化系数计算模型不确定系数的统计直方图,其中, $f(k_p)$ 为 k_p 的概率密度函数。采用 χ^2 法进行假设检验,表明在 0.05 的显著水平下各地区计算模型的不确定系数均服从对数正态分布的假定。对式(3),(5),(6)确定的碳化系数计算模型不确定系数进行假设检验也可以表明计算模型不确定系数服从对数正态分布。为了实际工程应用方便,本文各地区统一选取式(4)作为计算碳化系数的公式。

表 3 不同地区桥梁混凝土碳化系数计算模型不确定系数的统计参数

Tab. 3 Statistical Parameters of Uncertainty Factor of Concrete Carbonation Coefficient Calculation Model of Bridges in Different Regions						
公式编号	统计参数	沈阳地区	辽阳地区	鞍山地区	营口地区	大连地区
(3)	μ_{k_p}	0.99	0.96	0.88	0.95	0.80
	σ_{k_p}	0.47	0.89	0.61	0.78	0.51
	δ_{k_p}	0.47	0.93	0.69	0.82	0.64
(4)	μ_{k_p}	1.02	0.98	0.94	0.97	1.00
	σ_{k_p}	0.48	0.96	0.59	0.77	0.58
	δ_{k_p}	0.48	0.98	0.62	0.79	0.59
(5)	μ_{k_p}	0.99	0.98	0.96	0.98	1.00
	σ_{k_p}	0.46	0.97	0.59	0.76	0.59
	δ_{k_p}	0.47	0.99	0.62	0.78	0.59
(6)	μ_{k_p}	0.99	0.96	0.97	0.98	1.00
	σ_{k_p}	0.46	0.85	0.59	0.78	0.59
	δ_{k_p}	0.47	0.89	0.61	0.79	0.59

差; μ_{k_p} 、 δ_{k_p} 分别为 k_p 的平均值和变异系数。
将表 3 中数值代入式(10),(11)计算得到的 $\mu_{\ln(k_p)}$ 和 $\sigma_{\ln(k_p)}$ 如表 4 所示。

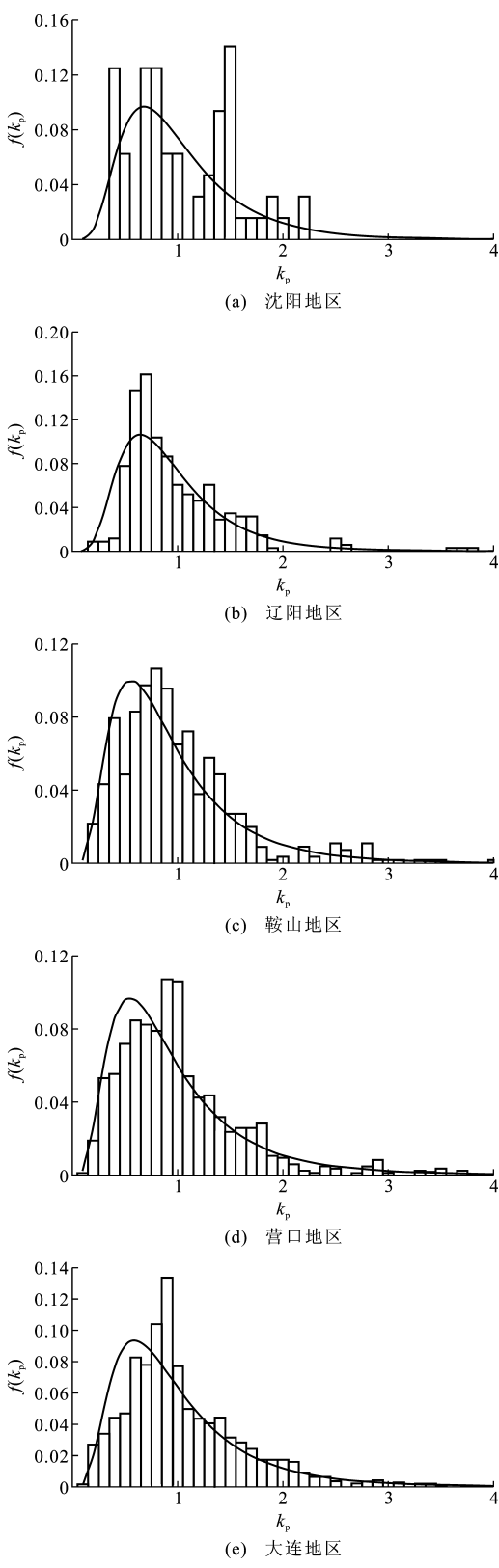


图3 不同地区混凝土碳化系数计算模型不确定系数的统计直方图

Fig.3 Statistical Histograms of Uncertainty Factor of Concrete Carbonation Coefficient Calculation Model of Bridges in Different Regions

表4 不同地区混凝土碳化系数计算模型不确定系数对数的统计参数

Tab.4 Statistical Parameters of Logarithm of Uncertainty Factor of Concrete Carbonation Coefficient Calculation Model of Bridges in Different Regions

统计参数	沈阳地区	辽阳地区	鞍山地区	营口地区	大连地区
$\mu_{\ln(k_p)}$	-0.11	-0.18	-0.23	-0.22	-0.17
$\sigma_{\ln(k_p)}$	0.52	0.51	0.60	0.62	0.60

2 沿线单个桥梁混凝土碳化模型和概率分析

前面研究的是沈海高速公路辽宁段沿线不同地区混凝土桥梁的碳化概率模型,反映了沿线不同地区桥梁混凝土碳化的总体概率特征,可用于该线路桥梁混凝土碳化耐久寿命的预测。对于同一地区,每座桥梁又有自身的特点,局部微环境不同,混凝土的碳化特征也有所差异。对同一地区的每座桥梁进行耐久性评估时,需采用每座桥梁各自的碳化概率模型。单个桥梁混凝土碳化深度的统计分析方法与前面不同地区桥梁的分析方法是相同的,只是采用每座桥梁各自的实测数据。下面以大连地区的海湾大桥为例说明单个桥梁的混凝土碳化分析结果。

2.1 统计分析

海湾大桥建于1990年,左、右分幅。该桥于2004年进行改扩建,原桥左侧新增半幅(左幅),原桥的左、右幅桥合为右幅。截至检测时,该桥左幅已使用11年,右幅已使用25年。按式(3)~(6)对该桥混凝土碳化系数进行拟合,得到各公式的拟合参数如表5所示,数据点和拟合曲线如图4所示。

表5 海湾大桥混凝土碳化系数公式拟合参数

Tab.5 Fitted Parameters of Concrete Carbonation Coefficients of Haiwan Bridge

参数	式(3)	式(4)	式(5)	式(6)
a	8.53	14.31	75.72	1 721.14
b	0.044	-1.460	0.091	157.130
d		1.49	0.48	-0.33

根据式(7)计算不同混凝土碳化系数公式的计算模型不确定系数,统计分析结果如表6所示。由表6可以看出,式(3)计算模型不确定系数的平均值和变异系数均较大,式(4)、式(5)和式(6)计算模型不确定系数的平均值和变异系数基本相同。为与大连地区碳化系数的计算模型一致,选取式(4)作为海湾大桥混凝土碳化系数的计算公式。

海湾大桥混凝土碳化系数计算模型不确定系数 k_p 的统计直方图如图5所示。采用 χ^2 法进行假设

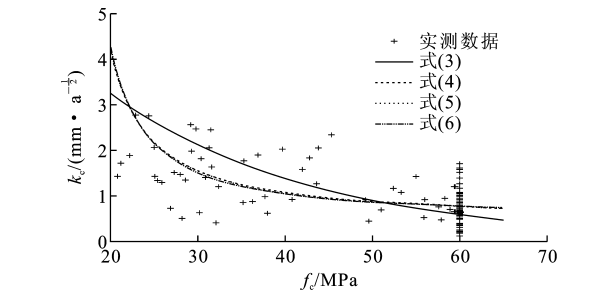


图 4 海湾大桥混凝土碳化系数拟合曲线

Fig. 4 Fitted Curves of Concrete Carbonation Coefficient of Haiwan Bridge

表 6 海湾大桥混凝土碳化系数计算模型不确定系数的统计参数

Tab. 6 Statistical Parameters of Uncertainty Factor of Concrete Carbonation Coefficient Calculation Model of Haiwan Bridge

统计参数	式(3)	式(4)	式(5)	式(6)
μ_{k_p}	1.11	0.99	0.99	0.99
σ_{k_p}	0.59	0.50	0.50	0.50
δ_{k_p}	0.53	0.50	0.50	0.51

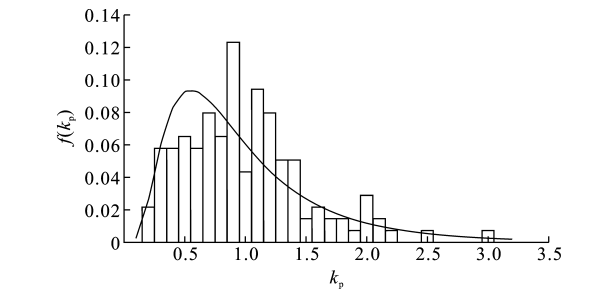


图 5 海湾大桥混凝土碳化系数计算模型不确定系数的统计直方图

Fig. 5 Statistical Histogram of Uncertainty Factor of Concrete Carbonation Coefficient Calculation Model of Haiwan Bridge

检验,结果表明在 0.05 的显著性水平下 k_p 服从对数正态分布的假设。

对海湾大桥左、右幅主要构件混凝土保护层厚度 c (按混凝土表面到箍筋外表面的距离计) 进行统计分析,结果如图 6 所示,其中 $f(c)$ 为 c 的概率密度函数。采用 χ^2 法进行假设检验,结果表明在 0.05 的显著水平下混凝土保护层厚度服从正态分布的假设。表 7 给出了左、右幅各混凝土构件混凝土保护层厚度的统计参数。

对实测的海湾大桥不同构件的混凝土抗压强度 f_c 进行了统计分析,其平均值、标准差和变异系数如表 8 所示,采用 χ^2 法进行统计假设检验,结果表明 f_c 服从正态分布的假设。由表 8 可以看出,海湾

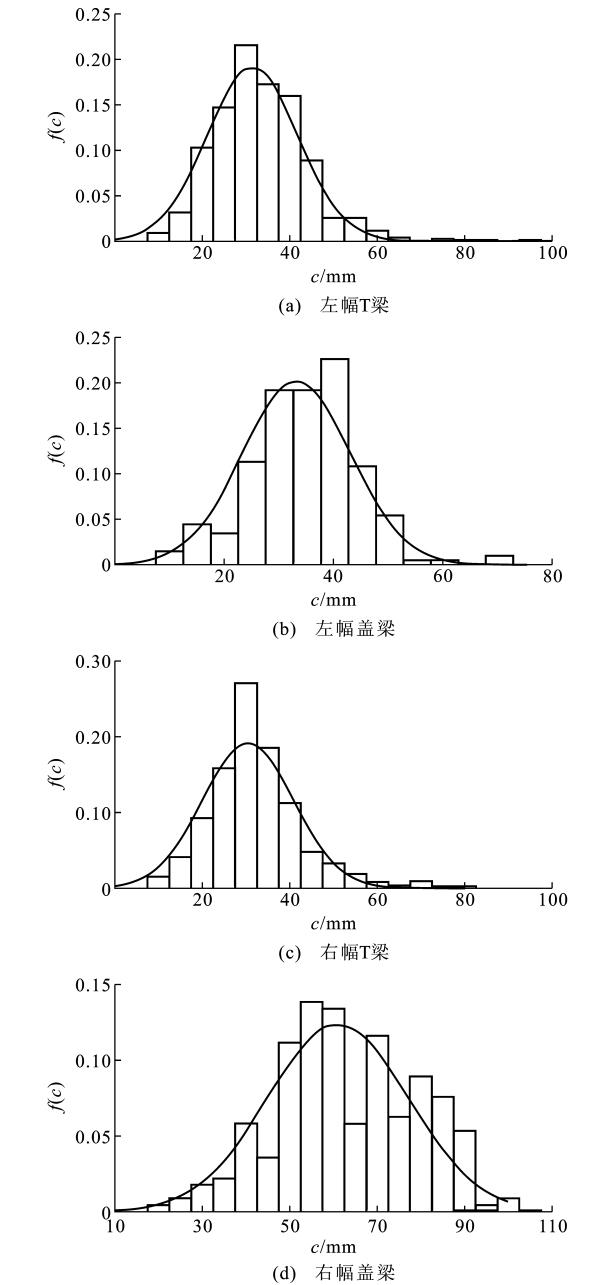


图 6 海湾大桥构件混凝土保护层厚度统计直方图

Fig. 6 Statistical Histograms of Thickness of Concrete Cover of Various Members of Haiwan Bridge

表 7 海湾大桥构件混凝土保护层厚度统计参数

Tab. 7 Statistical Parameters of Thickness of Concrete Cover of Members of Haiwan Bridge

统计参数	左幅		右幅	
	T 梁(箍筋)	盖梁(箍筋)	T 梁(箍筋)	盖梁(箍筋)
μ_c/mm	31.49	33.04	30.45	61.02
σ_c/mm	10.41	9.86	10.43	16.12
δ_c	0.33	0.30	0.34	0.26

注: $\mu_c, \sigma_c, \delta_c$ 分别为 c 的平均值、标准差和变异系数。

大桥左幅和右幅 T 梁的混凝土强度变异性都比较

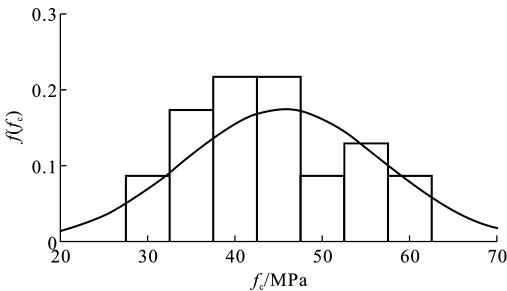
表 8 海湾大桥混凝土抗压强度统计参数

Tab.8 Statistical Parameters of Concrete Compression Strength of Haiwan Bridge

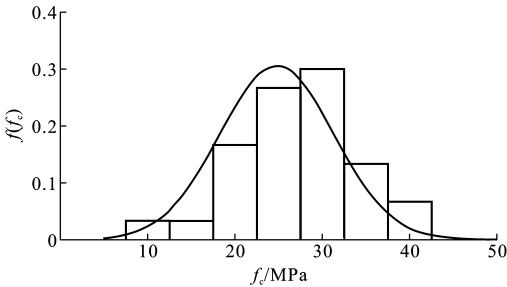
统计参数	左幅		右幅	
	T 梁	盖梁	T 梁	盖梁
μ_{f_c}/MPa	59.03	41.06	59.48	28.08
σ_{f_c}/MPa	2.88	9.66	1.78	5.54
δ_{f_c}	0.05	0.24	0.03	0.19

注： μ_{f_c} 、 σ_{f_c} 、 δ_{f_c} 分别为 f_c 的平均值、标准差和变异系数。

小,而左幅和右幅盖梁的混凝土强度变异性都比较大。左幅和右幅盖梁的混凝土强度统计直方图如图 7 所示,其中, $f(f_c)$ 为 f_c 的概率密度函数。由于左幅和右幅 T 梁的混凝土强度变异性较小,本文不再给出 T 梁混凝土强度的统计直方图。



(a) 左幅盖梁混凝土抗压强度统计直方图



(b) 右幅盖梁混凝土抗压强度统计直方图

图 7 海湾大桥混凝土抗压强度统计直方图

Fig.7 Statistical Histograms of Concrete Compression Strength for Haiwan Bridge

2.2 混凝土碳化到钢筋表面的概率

以混凝土碳化深度到达钢筋表面作为混凝土碳化失效的极限状态,建立功能函数 Z 为

$$Z=c-x_c=c-k_p(\frac{a}{\sqrt{f_c}+b}-d)\sqrt{t} \tag{12}$$

混凝土碳化到钢筋表面的概率 p 为

$$p=P(Z<0)=P(c-x_c<0) \tag{13}$$

式(13)可采用可靠度理论的一次二阶矩法计算。表 9 为计算得到的海湾大桥不同构件混凝土碳化失效的概率。由表 9 可以看出,按 100 年考虑,海湾大桥左幅和右幅 T 梁及盖梁混凝土碳化失效的概率都能满足中国《混凝土结构耐久性设计规范》

表 9 海湾大桥构件混凝土碳化失效概率

Tab.9 Failure Probabilities of Concrete Carbonization of Members of Haiwan Bridge

时间/年	左幅		右幅	
	T 梁(箍筋)	盖梁(箍筋)	T 梁(箍筋)	盖梁(箍筋)
10	0.002 6	0.002 4		
24	0.003 7	0.008 3	0.005 4	0.002 2
30	0.004 8	0.011 8	0.006 2	0.003 4
40	0.006 0	0.018 7	0.007 7	0.006 0
50	0.007 3	0.026 4	0.009 2	0.009 4
60	0.008 7	0.034 8	0.010 9	0.013 3
70	0.010 2	0.043 7	0.012 7	0.017 7
80	0.011 9	0.052 9	0.014 6	0.022 6
100	0.015 0	0.072 0	0.018 7	0.033 4

(GB/T 50746—2008)^[20]规定的概率不大于 10% 的要求。

3 结 语

(1)混凝土碳化深度随混凝土抗压强度的增大而减小;受多种复杂因素影响,混凝土碳化深度的离散性很大。

(2)混凝土碳化深度与混凝土抗压强度可用多个不同的模型描述,这些模型的精度相差不大。本文采用了碳化深度与混凝土抗压强度平方根成反比的关系,计算模型不确定系数服从对数正态分布。

(3)海湾大桥不同构件混凝土碳化失效概率小于 10%,符合中国耐久性标准的要求。

参考文献:

References:

[1] 韩建德,孙 伟,潘钢华. 混凝土碳化反应理论模型的研究现状及展望[J]. 硅酸盐学报,2012,40(8):1143-1153.
HAN Jian-de,SUN Wei,PAN Gang-hua. Recent Development on Theoretical Model of Carbonation Reaction of Concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2012,40(8):1143-1153.
[2] 肖 佳,勾成福. 混凝土碳化研究综述[J]. 混凝土,2010(1):40-44,52.
XIAO Jia,GOU Cheng-fu. Overview of the Research for Concrete Carbonation[J]. Concrete,2010(1):40-44,52.
[3] 龚洛书,苏曼青,王洪琳. 混凝土多系数碳化方程及其应用[J]. 混凝土,1985(6):10-16.
GONG Luo-shu,SU Man-qing,WANG Hong-lin. Application of Multi-coefficient Carbonated Equation[J]. Concrete,1985(6):10-16.

- [4] 许丽萍,黄士元. 预测混凝土中碳化深度的数学模型[J]. 上海建材学院学报,1991,4(4):347-357.
XU Li-ping, HUANG Shi-yuan. The Mathematical Model of Predicted Carbonation Depth in Concrete[J]. Journal of Building Materials, 1991, 4(4): 347-357.
- [5] 陈树亮. 混凝土碳化机理、影响因素及预测模型[J]. 水利电力科技, 2010, 36(2): 13-23.
CHEN Shu-liang. The Mechanism, Influencing Factors and Forecast Model of Concrete Carbonization[J]. Water Resources and Electric Power, 2010, 36(2): 13-23.
- [6] 牛荻涛,李春晖,宋 华. 复掺矿物掺合料混凝土碳化深度预测模型[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2010, 42(4): 464-467, 472.
NIU Di-tao, LI Chun-hui, SONG Hua. A Model for Predicting Carbonation Depth of Concrete with Multi-mineral Admixtures[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2010, 42(4): 464-467, 472.
- [7] 宋 华,牛荻涛,李春晖. 矿物掺合料混凝土碳化性能试验研究[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(12): 2066-2070.
SONG Hua, NIU Di-tao, LI Chun-hui. Carbonation Test of Concrete Containing Mineral Admixtures[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(12): 2066-2070.
- [8] 李春晖,牛荻涛,宋 华. 复掺矿物掺合料混凝土碳化试验研究[J]. 工程建设, 2009, 41(6): 7-11, 18.
LI Chun-hui, NIU Di-tao, SONG Hua. Experimental Research of Carbonization of Concrete with Composite Addition of Mineral Admixture[J]. Engineering Construction, 2009, 41(6): 7-11, 18.
- [9] 曹明莉,丁言兵,郑进炫,等. 混凝土碳化机理及预测模型研究进展[J]. 混凝土, 2012(9): 35-38, 46.
CAO Ming-li, DING Yan-bing, ZHENG Jin-xuan, et al. Overview the Mechanism and Forecast Model of Concrete Carbonization[J]. Concrete, 2012(9): 35-38, 46.
- [10] 张海燕,把多铎,王正中. 混凝土碳化深度的预测模型[J]. 武汉大学学报:工学版, 2006, 46(5): 42-45.
ZHANG Hai-yan, BA Duo-duo, WANG Zheng-zhong. A Model for Forecasting Carbonization Depth of Concrete[J]. Engineering Journal of Wuhan University: Engineering Science, 2006, 46(5): 42-45.
- [11] 田 浩,李国平,刘 杰,等. 受力状态下混凝土试件碳化试验研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(2): 200-204, 213.
TIAN Hao, LI Guo-ping, LIU Jie, et al. Experimental Research on Carbonation of Forced Concrete Specimens[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(2): 200-204, 213.
- [12] 卢朝辉,吴蔚琳,赵衍刚. 混凝土及预应力混凝土结构碳化深度预测模型研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(2): 368-375.
LU Zhao-hui, WU Wei-lin, ZHAO Yan-gang. Prediction Models for Carbonation Depth of Reinforced and Prestressed Concrete Structures[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(2): 368-375.
- [13] 杨林德,潘洪科,祝彦知,等. 多因素作用下混凝土抗碳化性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(3): 345-348.
YANG Lin-de, PAN Hong-ke, ZHU Yan-zhi, et al. Experimental Study of Concrete's Carbonization Resistance Under Combined Action of Factors[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(3): 345-348.
- [14] NEVES R, BRANCO F, DE BRITO J. Field Assessment of the Relationship Between Natural and Accelerated Concrete Carbonation Resistance[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 41: 9-15.
- [15] MONTEIRO I, BRANCO F A, DE BRITO J, et al. Statistical Analysis of the Carbonation Coefficient in Open Air Concrete Structures[J]. Construction and Building Materials, 2012, 29: 263-269.
- [16] 曾胜钟. 现场条件下混凝土碳化深度预测研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
ZENG Sheng-zhong. Study on Concrete Carbonation Depth Forecast in Jobsite [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [17] JGJ/T 23—2011, 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程[S].
JGJ/T 23—2011, Technical Specification for Inspecting of Concrete Compressive Strength by Rebound Method[S].
- [18] 张 誉,蒋利学,张伟平,等. 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, JIANG Li-xue, ZHANG Wei-ping, et al. Durability of Concrete Structures [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2003.
- [19] 牛荻涛,董振平,浦聿修. 预测混凝土碳化深度的随机模型[J]. 工业建筑, 1999, 29(9): 41-45.
NIU Di-tao, DONG Zhen-ping, PU Yu-xiu. Random Model of Predicting the Carbonated Concrete Depth[J]. Industrial Construction, 1999, 29(9): 41-45.
- [20] GB/T 50746—2008, 混凝土结构耐久性设计规范[S].
GB/T 50746—2008, Code for Durability Design of Concrete Structures[S].