

压应力下混凝土结构碳化试验研究

梁俊勇, 黄琪英, 王东, 毛亮

(四川理工学院土木工程学院, 四川 自贡 643000)

摘要:进行了在碳化箱中加速腐蚀碳化环境状态下的混凝土结构碳化试验,试件为直接受压的应力状态,阐述了试验中采用休哈特控制图对碳化深度数据进行采集和动态统计控制原理,建立了压应力状态下碳化深度动态统计控制模型。试验结果表明,该方法能有效的对钢筋混凝土结构在压应力工作状态下的碳化深度进行动态监测、分析、评价和控制,避免对结构的耐久性及稳定性产生不利影响,造成安全隐患,从而确保在承载环境中钢筋混凝土结构的质量和安全性。

关键词:压应力;钢筋混凝土;碳化;耐久性

中图分类号:TU375

文献标志码:A

引言

随着建筑工程项目规模的日益增大,钢筋混凝土的碳化腐蚀研究成为钢混结构的研究重点^[1]。而碳化腐蚀是钢筋混凝土结构疲劳破坏的主要原因及重要前提条件,目前,对于混凝土结构碳化腐蚀的研究主要集中在三个方面^[2]:首先是对碳化腐蚀机理的研究,对于此项研究的团队、研究方法较多,机理成因分析也比较成熟;陈立亭^[3]、黄涛^[4]等对混凝土碳化模型及其碳化机理参数进行了试验研究,提出了以混凝土抗压强度为主要参数,考虑气体扩散系数计算模型;其次是对钢筋混凝土碳化腐蚀深度预测模型的研究,如牛获涛^[5]运用随机模型对混凝土碳化深度进行预测;第三是对碳化腐蚀病害防治方法的研究,赵卫国^[6]等对公路钢筋混凝土梁桥的碳化病害防止分析,提出桥梁应对碳化病害的维护管理模型。迄今为止对其碳化腐蚀深度动态监测较少,尤其是桥梁、隧道等钢筋混凝土承载压应力环境状态下,鉴于此,本文首先通过加速碳化试验,对压应力状态下的钢筋混凝土结构碳化深度腐蚀测量试验,获得相关碳化数据,其次根据休哈特控制图原理设计碳化深度统

计控制模型,最后通过实例验证了该方法对实现动态分析和控制的有效性。

1 混凝土结构碳化研究意义

建筑施工生产不同于其他工业生产,混凝土结构,尤其是钢筋混凝土结构是目前全球最为广泛应用的土木结构形式之一,尤其是进入二十一世纪,随着我国城市化建设、新农村保障性安居工程、社会公共基础设施建设等项目的高速发展,我国每年消耗在钢筋混凝土结构上的费用达 2000 多亿元,根据中商产业研究院数据显示^[7],2014 年全年我国生产商品混凝土 1.56E9 立方米,同比增长 11.39%。特别是 2000 年之后,建筑业井喷式发展,使得建筑行业增加值占国内生产总值的比重保持在 6.65% 左右,总产值约 95 206 亿元,在整个国民经济中占据相当的比重。

混凝土结构被普遍认为是一种抗压及抗拉强度极好的建筑应用材料,从而在一定程度上忽视了钢筋混凝土结构的耐久性问题,而全球温室效应日益显著,尤其是我国目前大气中 CO₂ 的平均浓度接近 400 ppm,这一浓度水平比工业革命前约增加了 40%,预计到 2100 年

收稿日期:2016-04-10

基金项目:四川省教育厅自然科学基金(10ZB124);四川理工学院教学改革项目(B11605039)

作者简介:梁俊勇(1986-),男,河南新乡人,助教,硕士,主要从事土木工程建造与管理方面的研究,(E-mail)meihaodaziran@126.com

将上升到 650 ppm^[8],由此将对混凝土碳化腐蚀产生明显的促进作用,当 CO₂ 进入混凝土结构内,与混凝土内碱性物质发生中性化反应,当超过钢筋混凝土的保护层时,就会使混凝土失去对钢筋的钝化保护,使钢筋脱钝锈蚀,体积膨胀,引起保护层开裂或脱落,且钢筋与混凝土之间粘接力破坏、钢筋受力截面减小、结构耐久性降低,后果将是结构垮塌等安全事故。因此,进行混凝土碳化的深度在线监测和分析具有重要意义。

2 压应力下混凝土碳化试验方案设计

建筑施工混凝土碳化腐蚀是随着 CO₂ 气体向混凝土结构内部扩散,与孔隙水及各水化产物发生碳化反应的复杂的物理化学过程。由此可知^[9],影响碳化深度的

因素主要包括水泥品种、水泥量、水灰比、掺合料、外加剂、养护方式、搅拌方式、振捣方式、CO₂ 浓度、有害气体(包括成分和浓度等)、暴露温度、湿度、应力类型、应力大小、粉煤灰等级、配筋位置、浇注面等,本文仅针对压应力状态下混凝土结构进行碳化深度的试验和监测^[10]。

水泥试验材料选用天瑞水泥厂生产的 P.O 52.5 型普通硅酸盐水泥,砂子的细度模数为 2.3,级配为 II 区,含泥的质量分数为 0.15% (按质量计),泥块含量 0%,石子材质为石灰岩,小碎石,一级配 5~15 mm,容重为 1500 kg/m³。钢筋混凝土试件的配合比及混凝土抗压强度等级见表 1,其中 f_c 为混凝土抗压强度,压应力的实现采用后张法,试件尺寸 150 * 150 * 450 mm,混凝土所配钢筋统一为 φ10。

表 1 混凝土试件配合比

水灰比	水/kg	水泥/kg	砂子/kg	碎石/kg	减水剂/%	强度等级	压力状态	压力/MPa
0.4	180	450	675.5	1098.5	0.45	C42	0.5f _c	21.5

试验环境为实验室加速碳化,即试件置于碳化箱加速腐蚀^[11],碳化箱采用 DHS-010 型低温恒定湿热试验箱(试验温度调节范围 0~100 °C,湿度调节范围为 30%~98%)。国际上加速碳化试验的条件并不统一^[12],本碳化试验环境按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T50082-2009)规定执行^[13]。加速碳化箱环境详细参数设置见表 2。

表 2 碳化箱环境参数

CO ₂ 体积分数/%	湿度/%	温度/°C
20 ± 3	70 ± 5	20 ± 5

外光谱法等。本文采取实验室常用的酚酞指示剂法,即加速碳化时间第 30 d 时,取出试件破型,除去试件断面上残存的粉末,立即喷上酒精酚酞试剂。待断面上试剂干后,按每 15 mm 一个测点用游标卡尺分别测定自混凝土受压表面至深处不变色(未碳化部分呈紫红色)处垂直距离 1~2 次,该距离即为混凝土的碳化深度值。试件 30 d 时的碳化腐蚀深度值见表 3。为避免随机误差,试验设计分为 9 个组别,每个组别测 9 个样本点,其中 Z_i 代表组别, Y_i 表示样本, R 表示极差。

3.2 构建碳化深度控制模型

如果混凝土的碳化深度处于稳定的可控状态,即碳化深度在某一稳定值附近上下波动,由统计学知识可知,这时的碳化深度值 X 指标应该服从正态分布^[15],此时可通过构造适当的样本统计量利用显著性水平假设检验及休哈特控制图等对其进行碳化深度监测。

3 碳化深度测量方法和模型

3.1 碳化深度测量方法

目前,混凝土碳化深度测定使用频率比较高的方法有^[14]:酚酞指示剂法、热分析法、X 射线物相分析法和红

表 3 30 d 时混凝土试件受压面的碳化深度(单位/mm)

	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Mean	R
Z ₁	23.26	22.37	20.75	23.23	23.46	21.94	22.68	23.14	23.59	22.71	2.84
Z ₂	21.66	20.93	23.96	21.83	21.18	23.19	22.36	20.91	22.38	22.05	3.05
Z ₃	22.64	22.50	22.03	21.82	23.01	22.32	21.32	21.67	22.74	22.23	1.69
Z ₄	22.80	23.61	24.00	22.72	22.93	23.50	22.87	23.12	22.44	23.11	1.56
Z ₅	21.61	22.94	23.02	22.28	23.37	22.87	22.81	21.25	22.42	22.51	2.12
Z ₆	23.72	20.69	24.75	21.38	24.58	22.06	19.50	20.91	23.16	22.31	5.26
Z ₇	23.22	23.09	21.51	24.39	21.53	22.87	23.28	21.92	22.16	22.66	2.88
Z ₈	20.97	21.88	22.06	23.11	21.90	22.54	24.22	21.07	21.88	22.18	3.26
Z ₉	24.63	22.80	22.75	21.34	21.41	20.90	21.50	22.90	22.13	22.26	3.73

显著性假设检验,样本均值公式:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = 22.45$$

修正样本标准差:

$$S^* = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = 1.031$$

及试验数据表3可知:由正态总体随机抽样分布基本定理,在统计量 $T = \frac{\sqrt{n}(\bar{X} - X^*)}{S^*} \sim t(n-1)$ 下,在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 时,通过查阅 t 分布表可知样本监测值的接受与拒绝状态,即碳化深度是否超过正常值过大而造成疲劳破坏,其中 X^* 表示碳化深度的正常值。

根据正态总体随机抽样样本均值正态分布性质知

$$P\left\{\bar{X} - \frac{3R}{d_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \leq \bar{X} \leq \bar{X} + \frac{3R}{d_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}\right\} = 0.9973$$

$$P\left\{R - \frac{3e_n}{d_n} \bar{R} \leq R \leq \bar{R} + \frac{3e_n}{d_n} \bar{R}\right\} \geq 0.95$$

成立,再由切比雪夫不等式知混凝土的碳化深度 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 而极差却不一定服从正态分布,故采用 $\bar{X} - R$ 控制图进行碳化深度监测,如图1所示,其中,对于 \bar{X} 控制图、 R (极差)控制图的中心线、控制上下限分别为:

\bar{X} 控制图中心线:

$$CL = \bar{\bar{X}}$$

\bar{X} 控制图控制上限:

$$UCL = \bar{\bar{X}} + \frac{3R}{d_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}$$

\bar{X} 控制图控制下限:

$$LCL = \bar{\bar{X}} - \frac{3R}{d_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}$$

R 控制图中心线:

$$CL = \bar{R}$$

R 控制图控制上限:

$$UCL = \bar{R} + \frac{3e_n}{d_n} \bar{R}$$

R 控制图控制下限:

$$LCL = \bar{R} - \frac{3e_n}{d_n} \bar{R}$$

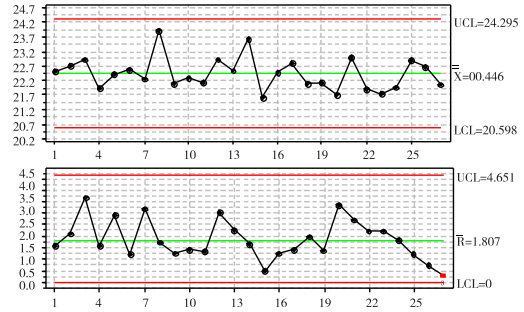


图1 30 d 碳化深度 \bar{X} - R 控制图

由两种方法对比可知,显著性假设检验方法每次对搜集到的监测样本数据,都需要查表计算得出监测控制值的接受与拒绝,不便参照对比单位时间内碳化深度的正常值,而 $\bar{X} - R$ 控制图,只要对采集到的数据进行整理后直接通过控制图进行监测是否偏离,以及偏离的密集程度,以便进行碳化腐蚀防护。

3.3 碳化深度监测试验控制应用

按照试验单一变量原则,以上述相同试验方案、试件及试验环境条件下,继续在碳化箱中进行碳化腐蚀,采用三段封闭,并相继分别测得 T_1 时刻 60 d、 T_2 时刻 120 d 时的碳化深度(表4)。

表4 混凝土试件的碳化深度(单位/mm)

时刻	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Mean	R	
T_1	Z_1	25.32	27.54	23.52	27.14	26.77	23.83	23.17	25.77	24.82	25.32	4.37
	Z_2	29.09	24.39	24.69	22.14	28.50	25.48	27.44	28.37	25.97	26.23	6.95
	Z_3	26.45	25.27	30.04	27.08	24.62	24.84	25.60	27.07	27.42	26.49	5.42
	Z_4	29.66	25.20	25.93	24.66	25.86	29.18	30.66	25.09	24.92	26.79	6.00
	Z_5	29.74	26.39	29.84	22.79	23.16	26.74	25.80	25.96	25.80	26.25	7.04
	Z_6	24.22	27.14	26.05	27.37	26.53	29.84	23.86	31.75	29.69	27.38	7.89
	Z_7	24.48	29.48	26.03	27.58	28.10	26.93	22.81	28.24	27.48	26.79	6.67
	Z_8	27.37	26.14	28.12	23.54	27.60	26.25	27.11	26.48	25.49	26.46	4.58
	Z_9	27.92	25.35	23.96	24.36	23.91	29.49	22.62	29.19	28.83	26.18	6.88
T_2	Z_1	33.85	33.58	32.92	35.32	36.13	36.36	33.65	35.60	36.11	34.83	3.45
	Z_2	34.99	35.20	32.19	35.82	32.78	32.72	34.15	34.86	35.82	34.28	3.63
	Z_3	33.51	33.70	31.51	34.88	33.55	35.59	33.66	35.78	32.73	33.88	4.28
	Z_4	35.81	34.00	37.41	35.91	32.47	33.98	35.60	35.10	32.97	34.81	4.94
	Z_5	32.99	33.24	37.63	33.68	33.01	33.44	36.02	33.44	35.58	34.34	4.65
	Z_6	33.01	34.80	32.48	34.84	33.68	34.88	33.71	32.67	35.08	33.91	2.60
	Z_7	33.24	33.56	34.14	35.52	32.44	35.77	36.78	33.75	37.39	34.73	4.95
	Z_8	36.12	31.95	36.93	33.62	34.76	33.87	34.18	35.20	32.74	34.38	4.97
	Z_9	34.09	34.45	34.98	35.99	37.04	34.31	35.85	33.60	31.80	34.68	5.24

查系数 d_n 表和系数 e_n 表得^[16]: $d_9 = 2.970$, $e_9 = 0.808$, 可以分批将表3、表4中的数据描在 $\bar{X} - R$ 图中,

采用 Access 数据库对采集数据进行存储和 Minitab 计算,形成动态数据和分析图,避免传统 excel 每次都需重新生成图形。将参数配置为 $\bar{X} - R$ 图的控制参数,从而得到不同测量阶段混凝土碳化深度的 $\bar{X} - R$ 控制图,如图 2、图 3 所示。

标准压应力下混凝土碳化深度数据得到碳化深度时间序列图如图 4 所示。若混凝土碳化深度不影响承载应力要求,则控制图处于稳定的标志应能满足基本条件^[17]:控制测量点的数值不超过控制界上限;控制测量点随机排列,无缺陷。

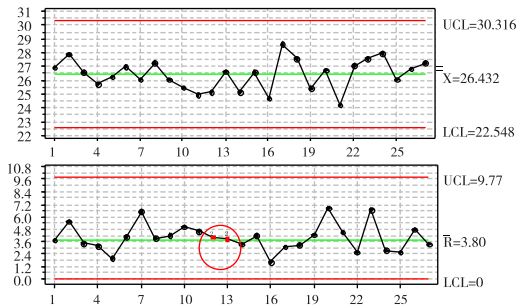


图 2 60 d 碳化深度 Xbar - R 控制图

若在标准压应力下混凝土碳化深度 Xbar - R 控制图出现以下四种情形之一:(1)控制测量点的数值在中心线的一侧连续出现 9 次以上,形成链;(2)连续 9 个以上的点同时出现同向趋势方向现象;(3)所有测量点都集中在中心线附近;(4)点子的排列呈周期性变动,即认为碳化深度过程发生异常。

表 5 应力状态下混凝土碳化深度对比

压力状态	压力/MPa	30d 碳化深度/mm		60d 碳化深度/mm		90d 碳化深度/mm		120d 碳化深度/mm	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
0.5f _c	21.5	22.45	0.89	26.37	2.21	31.52	2.43	34.27	1.75

4 结束语

本文通过对单一压应力状态下的混凝土碳化腐蚀深度进行监测试验,利用碳化深度控制图进行可视化数据分析,可以针对特定环境因素下的碳化腐蚀进行有效的预防控制,根据试验的单一变量原则,同样可以对影响碳化深度的其他因素,诸如水灰比、养护方式、搅拌方式、CO₂ 浓度、应力大小等进行在线监测试验,并可提前采用呋喃环氧树脂涂料、不饱和聚酯涂料等进行覆盖防护处理或混凝土再碱化等多种手段进行有效控制,进而保证混凝土结构质量的可靠性,对建筑物、构筑物的结构安全分析和安全防护具有非常重要的意义。

参考文献:

[1] 卢朝辉,吴蔚琳,赵衍刚.混凝土及预应力混凝土结

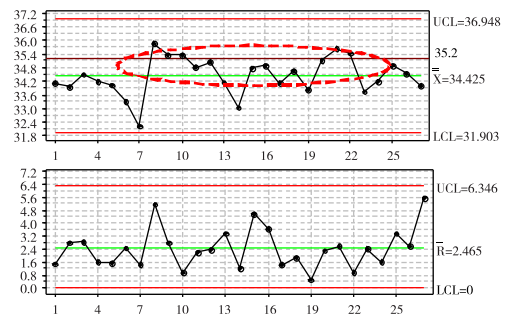


图 3 120 d 碳化深度 Xbar - R 控制图

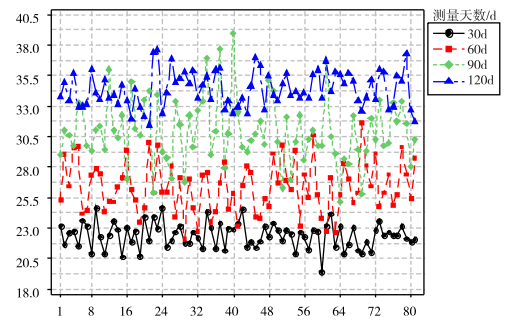


图 4 碳化深度时间序列图

试验结果显示,在标准压应力下,60 d 碳化深度 Xbar - R 控制图中有 2 测量点失败但仍处于控制限内,属于二类问题,属于测量系统误差导致,碳化过程依然稳定;120 d 碳化深度控制图中有 6 个测量点失效,其测量值虽都处于正常的碳化深度控制限之内,但是已经超过预定安全的承载应力范围(表 5)。

构碳化深度预测模型研究[J].铁道科学与工程学报,2015(2):368-375.

[2] 余波,成荻,杨绿峰.混凝土结构的碳化环境作用量化与耐久性分析[J].土木工程学报,2015(9):51-59.
 [3] 陈立亭.混凝土碳化模型及其参数研究[D].西安:西安建筑科技大学,2007.
 [4] 黄涛.荷载作用下混凝土碳化与氯盐侵蚀相互影响试验研究[D].杭州:浙江大学,2013.
 [5] 牛荻涛,孙丛涛.混凝土碳化与氯离子侵蚀共同作用研究[J].硅酸盐学报,2013(8):1094-1099.
 [6] 赵卫国.公路钢筋混凝土梁桥的病害分析与受损后承载能力计算[D].西安:长安大学,2007.
 [7] 牛荻涛.锈蚀开裂前混凝土中钢筋锈蚀量的预测模型[J].工业建筑,1996,26(4):8-11.

- [8] VISSER J H. Influence of the carbon dioxide concentration on the resistance to carbonation of concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 67(1): 8-13.
- [9] 刘均利. 混凝土桥梁耐久性评估与预测[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [10] SILVA A N, BRITO J. Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2014, 50(1): 73-81.
- [11] 陈立亭. 混凝土碳化模型及其参数研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- [12] 吴本英, 周锡武. 基于贝叶斯方法的混凝土结构碳化深度预测研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2011(3): 103-107.
- [13] 涂永明. 应力状态下混凝土的碳化试验研究[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2003, 33(5): 573-576.
- [14] SHEA K, SMITH I F. Improving full scale transmission tower design through topology and shape[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006(5): 781.
- [15] 张海燕. 混凝土碳化试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2006(8): 78-81.
- [16] 何良材. 应用概率统计[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2006.
- [17] 马逢时. 基于 MINITAB 的现代实用统计[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2013.

Monitoring the Carbonation Depth of Concrete Structure Under Stress

LIANG Junyong, HUANG Qiyong, MAO Liang, WANG Dong

(School of Architecture Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: The concrete carbonization tests under the environment of accelerated corrosion in carbonation tank were carried out. The specimens were in the state of direct compression stress. Hugh-hart control charts were used in test of carbonation depth data acquisition and statistical control principle, and the carbonation depth dynamic statistical control model under dynamic compressive stress state is established. Experimental results show that this method is effective in dynamically monitoring, analysing, evaluating and controlling the carbonation depth of reinforced concrete structure under the working condition of compressive stress, then the adverse effect on the durability and stability of the structure and the potential safety hazard is avoided to ensure the quality of the reinforced concrete structure in the hosting environment and security.

Key words: compressive stress; concrete structure; carbonization; durability