

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.124



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 冻融环境下的混凝土经时抗压强度

杨松<sup>a,b</sup>, 郑山锁<sup>a,b</sup>, 明铭<sup>a</sup>, 郑跃<sup>a</sup>

(西安建筑科技大学 a. 土木工程学院; b. 结构工程与抗震教育部重点实验室, 西安 710055)

**摘要:** 随着服役龄期的增加, 在役 RC 结构混凝土强度表现出多龄期退化特性。为研究冻融环境下混凝土抗压强度经时变化规律, 采用超声-回弹综合法与钻芯抽样修正试验相结合的方式, 对哈尔滨、吉林及其周边地区在役 RC 结构混凝土抗压强度进行现场实测。通过对获取的 924 组混凝土抗压强度数据进行归一化及归并处理, 采用非参数检验确定混凝土经时强度概率分布函数, 并对相关参数与服役龄期的相关关系进行回归分析。结果显示: 冻融环境下, 超声-回弹综合法的钻芯法修正时变模型满足线性变化规律; 不同服役龄期下混凝土相对抗压强度均服从正态分布; 混凝土相对抗压强度均值、标准差随服役龄期的变化规律可分别利用二次多项式模型与线性模型表征。

**关键词:** 冻融; 混凝土强度; 经时变化模型; 结构耐久性

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)04-0167-08

## Time-dependent compressive strength of concrete in freeze-thaw environment

YANG Song<sup>a,b</sup>, ZHENG Shansuo<sup>a,b</sup>, MING Ming<sup>a</sup>, ZHENG Yue<sup>a</sup>

(a. College of Civil Engineering; b. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance (XAUT), Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

**Abstract:** With the increase of service life, the concrete strength of existing RC building structure degrades. To study the change law of the time-dependent compressive strength of concrete under freeze-thaw environment, the compressive strength of concrete of existing RC buildings in Harbin, Jilin and its surrounding areas was tested on the spot by combining ultrasonic-rebound stress test with core-drilling method. By normalizing and merging 924 groups of concrete compressive strength data, nonparametric test method was adopted to determine the probability distribution function of the normalized concrete strength, and the relationship between relevant parameters and service age was analyzed by regression analysis. The test results show that under freeze-thaw environment, the modified time-varying model of ultrasonic-rebound stress test satisfies the linear variation law, the time-dependent concrete compressive strength obeys normal distribution, the variation of mean value and standard deviation of concrete relative compressive strength with service age can

**收稿日期:** 2021-11-02

**基金项目:** 国家重点研发计划(2019YFC1509302); 国家自然科学基金(52278530); 陕西省重点研发计划(2021ZDLSF06-10)

**作者简介:** 杨松(1996-), 男, 博士生, 主要从事结构抗震和防灾减灾研究, E-mail: yangsong1115@163.com。

郑山锁(通信作者), 男, 教授, 博士, E-mail: zhengshansuo@263.net。

**Received:** 2021-11-02

**Foundation items:** National Key R & D Program (No. 2019YFC1509302); National Natural Science Foundation of China (No. 52278530); Key R & D Projects in Shaanxi Province (No. 2021ZDLSF06-10)

**Author brief:** YANG Song (1996-), PhD candidate, main research interests: seismic and disaster prevention and mitigation of engineering structures, E-mail: yangsong1115@163.com.

ZHENG Shansuo (corresponding author), professor, PhD, E-mail: zhengshansuo@263.net.

be fitted by quadratic polynomial model and linear model respectively.

**Keywords:** freezing-thawing; concrete strength; time-dependent model; durability of RC structures

混凝土是工程中应用最广泛的建筑材料,服役环境影响,其力学性能表现出显著多龄期退化特性<sup>[1-4]</sup>,导致钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)结构力学及抗震性能的时变劣化,严重影响 RC 结构的耐久性<sup>[5-6]</sup>。武海荣<sup>[7]</sup>根据混凝土碳化、氯离子侵蚀、冻融损伤及硫酸盐侵蚀等耐久性劣化机理差异,将 RC 结构服役环境划分为一般大气环境、近海大气环境、冻融环境及其他化学腐蚀环境,并发现不同服役环境下,混凝土力学性能退化规律不尽相同。

混凝土抗压强度是确定 RC 结构构件抗力的基本参数,其经时变化规律是建立在役结构抗力衰减模型的基础。然而,郑山锁等<sup>[8]</sup>指出,在内部孔隙水周期性冻胀压力作用下,冻融环境中的混凝土水化产物密实度减小,水化产物间出现轻微裂缝,导致混凝土材料抗压强度明显降低,严重影响 RC 结构正常使用。针对此问题,学者们开展了大量研究。洪锦祥等<sup>[9]</sup>、Penttala 等<sup>[10]</sup>、邹超英等<sup>[11]</sup>通过对“快冻法”得到的冻融损伤混凝土试件进行抗压性能试验,建立了混凝土抗压强度随冻融循环次数的变化关系。施士升<sup>[12]</sup>采用更接近自然环境温度变化的冻融方式,研究了在该冻融条件下,冻融损伤对混凝土抗压强度等力学性能的影响。可以看出,目前冻融环境下混凝土抗压强度研究主要集中于实验室模拟环境。但由于客观条件限制,无论是环境还是服役时间,在实验室均无法精确模拟实际环境。因此有必要通过现场实测统计的方式,研究实际冻融环境下混凝土抗压强度的经时变化规律。

鉴于此,为研究实际冻融环境下混凝土抗压强度经时变化规律,笔者采用修正后的超声-回弹综合法对经受冻融循环作用影响的在役 RC 结构混凝土抗压强度进行了现场实测,利用非参数检验与子样本频率分布拟合的方式研究归并后子样本分布规律,继而对于子样本均值与标准差进行回归分析,得到了混凝土抗压强度均值与标准差的经时变化模型,为冻融环境下在役 RC 结构耐久性评估提供了研究基础。

## 1 混凝土强度数据

### 1.1 超声-回弹综合法的钻芯修正模型

混凝土抗压强度实测方法主要包括超声-回弹综合法与钻芯法。其中超声-回弹综合法操作简便,且对结构或构件无损伤,但测量结果误差较大<sup>[13]</sup>;钻

芯法测量结果相比超声-回弹综合法可信度高,缺陷是对结构或构件会产生一定的损伤<sup>[9]</sup>。鉴于此,首先采用超声-回弹综合法与钻芯抗压修正试验相结合的方式,实测具备钻芯取样条件的部分在役 RC 结构混凝土强度,建立了超声-回弹综合法的钻芯试验修正模型;随后利用修正后的超声-回弹综合法对不同服役龄期在役 RC 结构混凝土强度进行批量实测。

为获得混凝土抗压强度经时变化规律,结合现场条件,分别利用超声-回弹综合法与钻芯试验对 208 处测点进行了实测,继而利用可信度较高的钻芯试验结果对超声-回弹综合法实测数据进行修正,得到了不同服役龄期下超声-回弹综合法的钻芯修正系数,样本信息及相应的钻芯修正系数见表 1。需指出的是,该方法并不符合中国规范要求<sup>[14]</sup>,主要从学术角度研究混凝土抗压强度经时变化规律,所得结论可能无法直接应用于实际工程。

表 1 不同服役龄期下超声-回弹综合法的钻芯修正系数

Table 1 Core drilling correction coefficient of ultrasonic-rebound stress test under different service ages

编号	样本龄期/a	样本数量	修正系数
1	8	12	1.08
2	17	24	1.06
3	20	12	1.09
4	27	12	1.10
5	29	12	1.11
6	41	24	1.14
7	42	12	1.18
8	43	36	1.16
9	44	12	1.14
10	48	12	1.17
11	53	24	1.14
12	54	12	1.18

图 1 为钻芯修正系数与服役龄期关系散点图。由图 1 可以看出,钻芯修正系数均大于 1.06,且随着服役龄期的增长而增大。其原因为,结构在使用一定年限后,构件表面混凝土风化剥蚀,材料力学性能退化,导致超声-回弹综合法实测结果偏低,而钻芯试验所取芯样处于结构内部,强度相比构件表面混凝土较高。因此,采用钻芯试验数据修正超声-回弹综合法实测结果具有很大的必要性。

为进一步研究混凝土抗压强度钻芯修正系数随服役龄期的变化规律,对表 1 中不同龄期修正系数进行  $p$  元回归分析。根据以往研究<sup>[9]</sup>,回归分析显著性水平定义为 0.05,则对应的相关系数检验临界

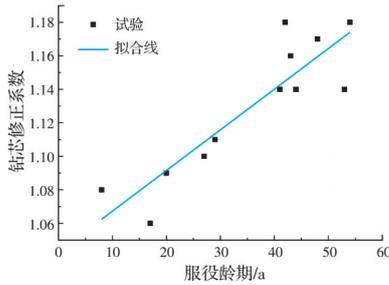


图 1 钻芯修正系数与服役龄期关系

Fig. 1 The relationship between coefficient of core correction and service time

值  $c$  如表 2 所示。

表 2 相关系数检验临界值

Table 2 Threshold values of related coefficient test

$p-2$	$c$
7	0.666
10	0.576
15	0.482

注:  $p$  为子样本容量。

采用式(1)所示的线性模型拟合钻芯修正系数随龄期的时变规律,回归分析相关系数为 0.78,大于表 2 中检验临界值 0.666,可见利用该模型量化钻芯修正系数与龄期间相关关系可信度较高,可用于后续混凝土强度超声-回弹综合法批量实测结果修正。

$$\zeta(t) = 0.00243t + 1.043 \quad (1)$$

式中:  $t$  为结构的服役龄期,  $a$ 。

### 1.2 混凝土强度数据来源

为建立混凝土抗压强度经时变化模型,利用超声-回弹综合法对哈尔滨、吉林及其周边县市在役 RC 结构进行了批量实测,并利用钻芯修正模型对超声-回弹综合法实测结果进行修正,共得到修正后混凝土抗压强度实测结果 924 组。其中实测建筑建造最早年份为 1965 年,建造最晚年份为 2007 年,结构服役龄期范围为 11~62 a。

实测区域(哈尔滨、吉林及其周边县市)均位于中国东北,基于武海荣等<sup>[15]</sup>、Ji 等<sup>[16]</sup>提出的现场冻融循环次数计算及冻融环境耐久性作用等级区划方法,实测区域现场冻融循环次数均在 100~160 次/年范围内,冻融环境耐久性作用等级均为第四级,属受冻融危害严重地区。

由于不同测区混凝土强度并不相同,无法直接使用实测结果建立混凝土强度随服役龄期的退化规律,因此,需对混凝土强度实测值进行归一化处理。以每栋建筑混凝土抗压强度实测值与其初始抗压强度比值为研究参数,即混凝土相对抗压强度,可用式(2)计算。

$$\xi(t) = f_{cu,e}^c(t) / f_{cu} \quad (2)$$

式中:  $\xi(t)$  为混凝土相对抗压强度;  $f_{cu,e}^c(t)$  为每个测区混凝土抗压强度推定值;  $f_{cu}$  为混凝土初始抗压强度平均值,取值方法为:1)对于有详细竣工资料建筑,混凝土初始抗压强度取工程竣工时预留混凝土试块抗压强度平均值;2)对于缺少详细竣工资料建筑,根据设计资料中混凝土抗压强度设计值与标准值,推算混凝土 28 d 抗压强度平均值,作为初始抗压强度。

## 2 混凝土强度分布规律

建立混凝土抗压强度经时变化模型,首先需明确不同服役龄期下混凝土抗压强度分布规律。郑山锁等<sup>[8]</sup>与洪锦祥等<sup>[9]</sup>的研究表明,海洋环境与一般大气环境下,在役 RC 结构混凝土抗压强度均服从正态分布,且其均值与标准差为结构服役龄期的函数。鉴于此,假设冻融环境下在役 RC 结构混凝土抗压强度同样服从正态分布,并利用非参数检验与子样本频率分布拟合的方式对其进行验证。

当样本容量超过 100 时,利用正态分布曲线拟合子样本频率分布直方图,直观判断二者拟合关系。限于篇幅,仅以服役龄期  $t=28$  a 子样本为例,给出了其频率分布的正态分布拟合结果,如图 2 所示。由图 2 可以看出,频率分布直方图与正态分布曲线拟合较好,可认为该服役龄期下混凝土相对抗压强度服从正态分布。

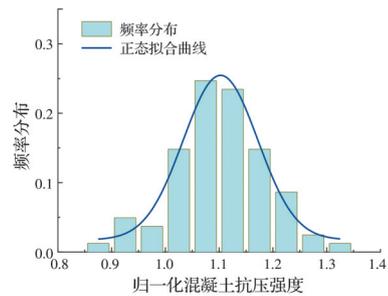


图 2 子样本频率分布的正态拟合

Fig. 2 Normal fitting of subsample frequency distribution

当样本容量不超过 100 时,频率分布直方图无法有效地与正态分布曲线对比,需采用其他方式判别子样本是否服从正态分布。为此,选用非参数检验中哥尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫(Kolmogorov-Smirnor)检验法<sup>[17]</sup>(简称 K-S 检验法)对所有子样本进行假设检验。其基本思路为:将样本实测值的累积概率( $F_n(x)$ )与假设的理论概率分布( $F_X(x)$ )相比较来建立统计量。

若样本容量为  $n$ ,可采用式(3)计算分段累积频率。

$$F_n(x) = \begin{cases} 0, & x < x_i \\ \frac{i}{n}, & x_i \leq x \leq x_{i+1} \\ 1, & x \geq x_{i+1} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $x_1, x_2 \dots x_n$ 为排列后的样本数据； $F_n(x)$ 为样本实测值的累积概率。

在随机变量  $X$  的全部范围内， $F_n(x)$ 与  $F_X(x)$ 之间的最大差异为

$$D_n = \max_{-\infty < x < +\infty} |F_X(x) - F_n(x)| \quad (4)$$

式中： $D_n$ 为一个随机变量，其分布依赖于  $n$ 。当子样本统计量  $D_n$  小于显著性水平  $\alpha=0.05$  上临界值  $D_n^\alpha$  时，则认为子样本服从正态分布。

表 3、表 4 分别给出了以 1 a 为单位和以 5 a 为单位归并后各子样本 K-S 检验结果。可以看出，各子样本统计量  $D_n$  均小于临界值  $D_n^\alpha$ ，即可认为各子样本均服从正态分布。因此，混凝土抗压强度经时变化规律研究，即转化为子样本均值、标准差随服役龄期变化规律研究。

表 3 以 1 a 为单位归并后各子样本 K-S 检验结果

Table 3 K-S test results of each subsample after merging date in 1 year as a unit

编号	样本龄期/a	样本数量	$D_n$	$D_n^\alpha$
1	11	45	0.121	0.203
2	22	36	0.210	0.227
3	23	36	0.171	0.227
4	28	81	0.102	0.151
5	29	36	0.209	0.227
6	30	81	0.144	0.151
7	31	48	0.177	0.196
8	32	39	0.163	0.218
9	33	39	0.200	0.218
10	34	39	0.201	0.218
11	35	36	0.177	0.227
12	36	36	0.129	0.227
13	50	72	0.138	0.160
14	51	36	0.826	0.227
15	55	84	0.110	0.149
16	58	99	0.122	0.137
17	62	81	0.150	0.151

### 3 混凝土相对抗压强度经时变化规律研究

#### 3.1 以 1 a 为单位归并

以 1 a 为时间尺度，对各测区混凝土相对抗压强度数据归并处理，共得到 17 个子样本，各子样本容量分布如图 3 所示，表 5 列出了各子样本均值与标准差。

图 4 为以 1 a 为单位归并后样本均值与标准差

表 4 以 5 a 为单位归并后各子样本 K-S 检验结果

Table 4 K-S test results of each subsample after merging date in 5 year as a unit

编号	样本龄期/a	样本数量	$D_n$	$D_n^\alpha$
1	12.5	45	0.194	0.203
2	22.5	72	0.115	0.160
3	27.5	198	0.093	0.097
4	32.5	201	0.094	0.096
5	37.5	36	0.198	0.227
10	47.5	72	0.142	0.160
11	52.5	120	0.108	0.124
12	57.5	99	0.123	0.137
13	62.5	81	0.148	0.151
14	51	36	0.826	0.227

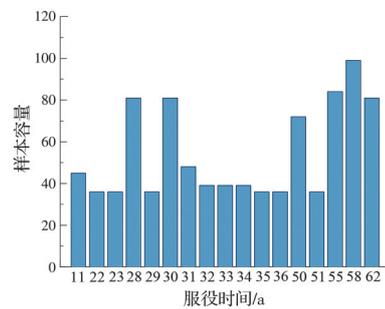


图 3 以 1 a 为单位归并后样本容量分布

Fig. 3 The distribution of sample size after merging date in 1 year as a unit

表 5 以 1 a 为单位归并后子样本的均值、标准差

Table 5 Mean value and standard deviation of subsamples after merging date in 1 year as a unit

样本龄期/a	样本数量	均值	标准差
11	45	1.083	0.053
22	36	1.173	0.053
23	36	1.121	0.061
28	81	1.102	0.087
29	36	1.106	0.096
30	81	1.158	0.082
31	48	1.195	0.100
32	39	1.128	0.116
33	39	1.149	0.137
34	39	1.035	0.062
35	36	1.103	0.104
36	36	1.010	0.104
50	72	0.900	0.119
51	36	0.871	0.122
55	84	0.851	0.155
58	99	0.808	0.156
62	81	0.796	0.152

随服役龄期的变化关系。可以看出，混凝土相对抗压强度均值在一定服役龄期内呈增长趋势，达到极限强度后，随服役龄期的增加而迅速降低；混凝土相对抗压强度标准差随服役龄期增长而增大，整体

增长趋势相对缓慢。

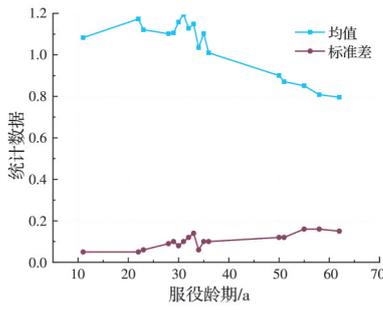


图 4 以 1 a 为单位归并后样本均值、标准差随龄期变化规律  
**Fig. 4 The variation of sample mean, standard deviation with age after merging date in 1 year as a unit**

为得到混凝土抗压强度均值变化规律的确定性时间函数表达式,基于图 4 中混凝土相对抗压强度均值随服役龄期变化规律,并结合已有研究<sup>[7-8]</sup>,选用式(5)所示二次多项式模型对混凝土相对抗压强度均值与龄期间相关关系进行拟合,拟合结果如图 5 与式(5)所示。其相关系数为 0.879,大于临界相关系数 0.482(见表 2),说明该模型可较好地反映混凝土相对抗压强度均值随服役龄期的变化规律。

$$\mu(t) = -2.484 \times 10^{-4}t^2 + 1.093 \times 10^{-2}t + 1.012 \quad (5)$$

式中: $t$ 为结构服役龄期, $a$ 。

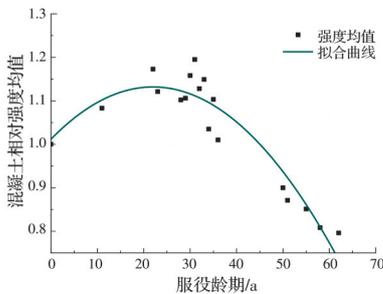


图 5 以 1 a 为单位归并后相对强度均值-龄期关系  
**Fig. 5 The relationship between mean of normalized strength and service time after merging date in 1 year as a unit**

分别采用线性与多项式模型(式(6)与式(7))对相对抗压强度标准差与服役龄期间相关关系进行拟合,拟合结果如图 6 所示。其中,线性模型与二次多项式模型相关系数分别为 0.740 与 0.720,均大于临界相关系数 0.482(见表 2)。考虑到线性模型更符合标准差随服役龄期增长而增大的变化规律,且其相关系数大于二次多项式模型相关系数,故选用线性模型模拟混凝土相对强度标准差随服役龄期的变化规律。

线性模型为

$$\sigma(t) = 2.13 \times 10^{-3}t + 2.576 \times 10^{-2} \quad (6)$$

二次多项式模型为

$$\sigma(t) = -6.57 \times 10^{-6}t^2 + 2.64 \times 10^{-3}t + 1.709 \times 10^{-2} \quad (7)$$

式中: $t$ 为结构服役龄期, $a$ 。

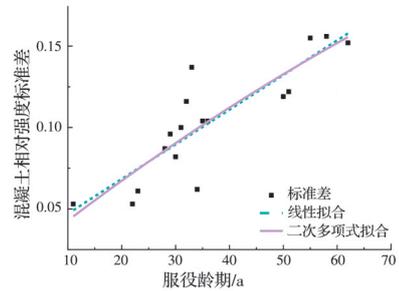


图 6 以 1 a 为单位归并后相对强度标准差-龄期关系  
**Fig. 6 The relationship between standard deviation of normalized strength and service time after merging date in 1 year as a unit**

### 3.2 以 5 a 为单位归并

为降低个别突变数据对分析结果的影响,以 5 a 为时间尺度,对 924 组混凝土强度实测数据重新归并,共得到 9 组新子样本,重新归并后各子样本容量分布见图 7,新子样本混凝土相对抗压强度均值与标准差列于表 6。

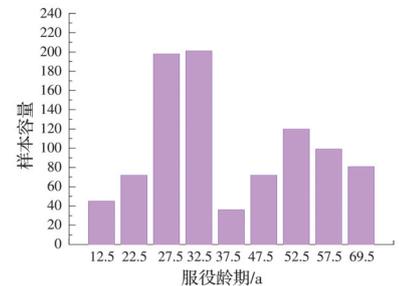


图 7 以 5 a 为单位归并后样本容量分布  
**Fig. 7 The distribution of sample size after merging date in 5 year as a unit**

表 6 以 5 a 为单位归并后子样本的均值和标准差  
**Table 6 Mean value and standard deviation of subsamples after merging date in 5 year as a unit**

样本龄期/a	样本数量	均值	标准差
12.5	45	1.083	0.053
22.5	72	1.147	0.062
27.5	198	1.126	0.091
32.5	201	1.126	0.119
37.5	36	1.010	0.104
47.5	72	0.900	0.119
52.5	120	0.857	0.146
57.5	99	0.808	0.156
62.5	81	0.796	0.152

图 8 为以 5 a 为单位归并后样本均值与标准差随服役龄期的变化关系。可以看出,混凝土相对抗压强度均值与标准差的时变规律,与以 1 a 为归并单

位所得变化规律大体一致,但整体变化趋势更为明显。

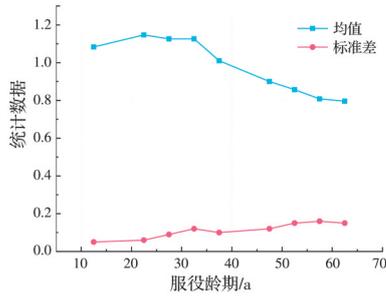


图 8 以 5 a 为单位归并后样本均值、标准差随龄期变化规律  
Fig. 8 The variation of sample mean , standard deviation with age after merging date in 5 year as a unit

采用式(5)所示二次多项式模型对图 8 中相对抗压强度均值与服役龄期间相关关系进行拟合,拟合结果如图 9 与式(8)所示。拟合相关系数为 0.889,大于临界相关系数 0.666(见表 2),表明该模型可较好地反映混凝土相对抗压强度均值随服役龄期变化规律。

$$\mu(t) = -2.137 \times 10^{-4}t^2 + 8.860 \times 10^{-3}t + 1.017 \quad (8)$$

式中: $t$ 为结构服役龄期, $a$ 。

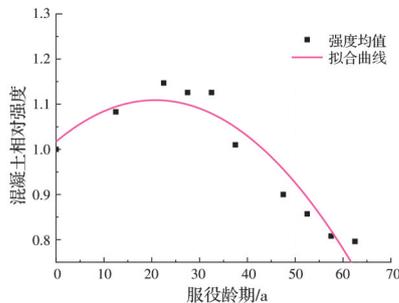


图 9 以 5 a 为单位归并后相对强度均值-龄期关系  
Fig. 9 The relationship between mean of normalized strength and service time after merging date in 5 year as a unit

对以 5 a 为单位重新归并后的样本,仍采用线性模型与二次多项式模型(式(6)与式(7))共同拟合相对抗压强度标准差与服役龄期间相关关系,拟合结果如图 10 与式(9)~式(10)所示。线性模型、二次多项式模型对应的相关系数分别为 0.903 与 0.896,均满足显著性水平要求。考虑到线性模型拟合效果更优,且使用简便,故选用线性模型模拟混凝土相对强度标准差随服役龄期变化规律。

线性模型:

$$\sigma(t) = 2.12 \times 10^{-3}t + 2.84 \times 10^{-2} \quad (9)$$

二次多项式模型:

$$\sigma(t) = -1.32 \times 10^{-5}t^2 + 3.13 \times 10^{-3}t + 1.233 \times 10^{-2} \quad (10)$$

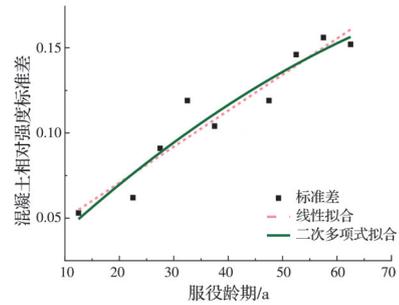


图 10 以 5 a 为单位归并后相对强度标准差-龄期关系  
Fig. 10 The relationship between standard deviation of normalized strength and service time after merging date in 5 year as a unit

式中: $t$ 为结构服役龄期, $a$ 。

### 3.3 不同归并方式对比分析

图 11 为不同归并单位下混凝土抗压强度均值拟合结果对比。由图 11 可以看出,不同归并单位所对应的拟合曲线趋势相同,即混凝土抗压强度均值在一定服役龄期内呈增长趋势,当超过某一龄期后,随着服役龄期的增长而不断降低。这是因为冻融环境下,混凝土在服役初期受到冻融循环作用,导致混凝土抗压强度有所劣化,但初期混凝土中水泥熟料矿物在一定的温、湿度条件下不断水化,增多的水泥凝胶体填充于毛细孔中,使混凝土内部结构更加密实,混凝土抗压强度随之不断提高,且提高程度大于冻融损伤造成的退化程度;而当服役龄期达到一定年限后,腐蚀介质侵入与冻融循环共同产生的劣化作用超过了混凝土本身强度增长,混凝土抗压强度开始呈现降低趋势。

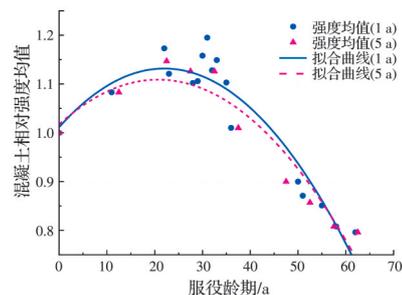


图 11 分别以 1 a 和 5 a 为单位归并后均值-龄期关系对比  
Fig. 11 Comparison of mean-age relationship after merging data in 1 year and 5 years respectively

两种拟合结果不同在于,服役龄期  $t=20\sim 30$  a 范围内,即混凝土强度发展至最大值阶段,以 5 a 为归并单位对应的混凝土强度值偏小。这是因为增大归并处理的时间尺度,降低了个别突变样本点对拟合结果的影响,拟合结果更加合理。对比回归分析相关系数,以 5 a 为归并单位对应的相关系数为 0.889,大于以 1 a 为归并单位对应的相关系数 0.879,表明前者对应的时变模型可信度更高。故

最终选用式(5)所示二次多项式模型,反映冻融环境下混凝土相对抗压强度均值时变规律。

图12为不同归并单位下混凝土抗压强度标准差拟合结果对比。可以看出,不同归并单位对应的样本标准差数据虽有所变动,但拟合曲线基本重合,证明混凝土强度标准差随服役龄期的增长而增大,且不受上述均值随龄期变化规律的影响。对比回归分析相关系数,以5a为归并单位对应的相关系数为0.903,大于以1a为归并单位对应的相关系数0.740,即表明前者对应的时变模型可信度更高。故最终选用式(6)所示线性模型,替换冻融环境下混凝土相对抗压强度标准差时变规律。

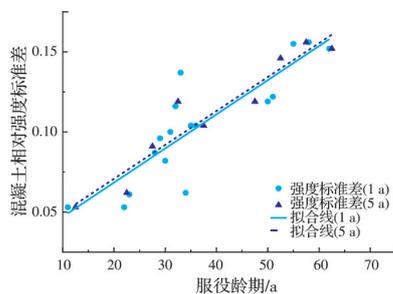


图12 分别以1a和5a为单位归并后标准差-龄期关系对比  
Fig. 12 Comparison of standard deviation - age relationship after merger data in 1 year and 5 years

基于此,分析了冻融环境下混凝土相对抗压强度均值与标准差的经时变化规律。该研究仅具有混凝土抗压强度经时变化规律的学术意义,所得统计规律有助于研究人员与工程师从整体上把握中国北方地区冻融环境下混凝土强度的时变规律。

然而需要指出的是,图1所示钻芯修正系数随服役龄期的时变规律虽满足回归分析精度要求,但仍具有较大的离散性。这与分析过程未考虑混凝土的水泥和骨料品种、外加剂、养护和成型方法等因素有关。因此,在后续研究中应进一步分析上述因素对钻芯修正系数时变规律的影响,建立更精确的混凝土抗压强度时变模型。

## 4 结论

1)结合超声-回弹综合法与钻芯抗压试验,对部分在役RC结构混凝土抗压强度进行实测,得到了不同服役龄期下超声-回弹综合法修正系数,建立了冻融环境下超声-回弹综合法实测结果的时变修正模型。

2)利用K-S非参数检验与子样本频率分布的方式,研究了归并后各子样本分布规律,发现不同归并单位对应的混凝土抗压强度子样本均服从正态分布。

3)通过对不同子样本分布参数进行回归分析,利用二次多项式与线性函数拟合均值、标准差与服役龄期间相关关系,建立了冻融环境下混凝土强度经时变化模型。

## 参考文献

- [1] RAGOUG R, METALSSIO O, BARBERON F, et al. Durability of cement pastes exposed to external sulfate attack and leaching: Physical and chemical aspects [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 116: 134-145.
- [2] 时旭东, 李亚强, 李俊林, 等. 不同超低温温度区间冻融循环作用混凝土受压强度试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 153-164.  
SHI X D, LI Y Q, LI J L, et al. Experimental study on the compressive strength of concrete undergoing freeze-thaw cycle actions with different ultralow temperature ranges [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 153-164. (in Chinese)
- [3] KESSLER S, THIEL C, GROSSE C U, et al. Effect of freeze-thaw damage on chloride ingress into concrete [J]. Materials and Structures, 2017, 50(2): 121.
- [4] DE BRUYN K, BESCHER E, RAMSEYER C, et al. Pore structure of calcium sulfoaluminate paste and durability of concrete in freeze-thaw environment [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2017, 11(1): 59-68.
- [5] ALNAHHAL M F, ALENGARAM U J, JUMAAT M Z, et al. Effect of aggressive chemicals on durability and microstructure properties of concrete containing crushed new concrete aggregate and non-traditional supplementary cementitious materials [J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 482-495.
- [6] 姜文镗, 刘清风. 冻融循环下混凝土中氯离子传输研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(2): 258-272.  
JIANG W Q, LIU Q F. Chloride transport in concrete subjected to freeze-thaw cycles-A short review [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(2): 258-272. (in Chinese)
- [7] 武海荣. 混凝土结构耐久性环境区划与耐久性设计方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
WU H R. Durability environmental zoning and durability design method of concrete structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [8] 郑山锁, 张艺欣, 裴培, 等. 冻融循环作用下钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(6): 84-91.  
ZHENG S S, ZHANG Y X, PEI P, et al. Experimental research on seismic behavior of reinforced concrete columns subjected to freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(6): 84-91. (in Chinese)

- Chinese)
- [9] 洪锦祥, 缪昌文, 刘加平, 等. 冻融损伤混凝土力学性能衰减规律[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 173-178.  
HONG J X, MIAO C W, LIU J P, et al. Degradation law of mechanical properties of concrete subjected to freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2): 173-178. (in Chinese)
- [10] PENTTALA V, AL-NESHAWY F. Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(9): 1407-1420.
- [11] 邹超英, 赵娟, 梁锋, 等. 冻融作用后混凝土力学性能的衰减规律[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 117-123, 138.  
ZOU C Y, ZHAO J, LIANG F, et al. Degradation of mechanical properties of concrete caused by freeze-thaw action [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 117-123, 138. (in Chinese)
- [12] 施士升. 冻融循环对混凝土力学性能的影响[J]. 土木工程学报, 1997, 30(4): 35-42.  
SHI S S. Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties of concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(4): 35-42. (in Chinese)
- [13] 超声回弹综合法检测混凝土抗压强度技术规程: T/CECS 02—2020 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.  
Technical specification for testing compressive strength of concrete by ultrasonic rebound comprehensive method: T/CECS 02—2020 [S]. Beijing: China Planning Press, 2020. (in Chinese)
- [14] 建筑结构检测技术标准: GB/T 50344—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.  
Technical standard for inspection of building structure: GB/T 50344—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese)
- [15] 武海荣, 金伟良, 延永东, 等. 混凝土冻融环境区划与抗冻性寿命预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(4): 650-657.  
WU H R, JIN W L, YAN Y D, et al. Environmental zonation and life prediction of concrete in frost environments [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(4): 650-657. (in Chinese)
- [16] 纪 XD, 宋 Y P, 刘 Y. Effect of freeze-thaw cycles on bond strength between steel bars and concrete [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2008, 23(4): 584-588.
- [17] 杨虎, 刘琼荪, 钟波. 数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.  
YANG H, LIU J S, ZHONG B. Mathematical statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)

(编辑 胡玲)