

# 暴露环境下普通混凝土耐久性试验及 基于加速系数 $K$ 法寿命预测研究

乔宏霞<sup>a,b</sup>, 郭 飞<sup>a</sup>, 路承功<sup>a</sup>, 何海杰<sup>a</sup>

(兰州理工大学 a.甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室; b.西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 针对影响混凝土耐久性的关键因素,进行了混凝土室内冻融试验和现场暴露试验,以单评价指标 $\omega_a$ 、 $\omega_b$ 和综合评价参数 $\omega$ 评价混凝土耐久性,并采用加速试验法对暴露环境下混凝土的寿命进行预测。其结果表明:加速系数 $K$ 是关于 $\omega$ 的函数,通过加速法得到0.30、0.35、0.43水灰比的试件分别在51.98、39.13、25.35年达到破坏,水灰比越小,混凝土预测使用寿命越长;室内冻融条件下, $\omega_a$ 整体呈下降趋势, $\omega_b$ 虽有小幅波动,但整体也是呈下降趋势;现场暴露条件下,在近300d的暴露时间内,虽然混凝土试件没有达到破坏,但是可以看出其评价参数也在缓慢下降,这是外界腐蚀性离子与当地气候环境综合作用的结果。

**关键词:** 冻融循环; 室外暴露; 混凝土耐久性; 加速系数; 寿命预测

**中图分类号:** TU528.01      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-3550(2020)04-0148-05

## Experimental study on durability of concrete in exposed environment based on acceleration coefficient $K$ and its life prediction

QIAO Hongxia<sup>a,b</sup>, GUO Fei<sup>a</sup>, LU Chenggong<sup>a</sup>, HE Haijie<sup>a</sup>

(a.Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering;

b.Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** In view of key factors affecting durability of concrete, through indoor freeze-thaw test and field exposure test, the durability of concrete is evaluated by single evaluation index  $\omega_a$ ,  $\omega_b$  and comprehensive evaluation parameter  $\omega$ , and the life of concrete in exposed environment is predicted by accelerated test method. The results show that the acceleration factor  $K$  is a function of  $\omega$ , the samples with a water-cement ratio of 0.30, 0.35 and 0.43 were respectively damaged in 51.98, 39.13 and 25.35 years, the smaller the ash ratio is, the longer the expectancy life of concrete is. Under the condition of indoor freeze-thaw,  $\omega_a$  shows a downward trend on the whole, and  $\omega_b$  shows a downward trend despite a small fluctuation. In the field exposure condition, during the nearly 300 d exposure time, although the concrete specimen did not reach the damage, it can be seen that its evaluation parameters are slowly declining, which is the result of the combined action of external corrosive ions and local climate environment.

**Key words:** freeze-thaw cycle; field exposure; concrete durability; acceleration coefficient; life prediction

## 0 引言

自1824年波特兰水泥问世以来,水泥混凝土材料便占据了工程建设中的大片市场,并一跃成为21世纪建筑工程与基础工程最主要的结构材料。然而当前国内混凝土结构的耐久性<sup>[1]</sup>问题比较突出,其中冻融循环作为影响混凝土耐久性<sup>[2]</sup>的重要因素,是我们不能忽视的一个方面。

目前对混凝土抗冻性的研究已经取得一部分成果,程云虹等<sup>[3-7]</sup>以多组不同水灰比和引气剂的混凝土试件进行试验,研究表明,引气剂的加入明显改善了混凝土的抗冻性能,随着引气剂掺量的增加,其抗冻性能呈现出先增后减的变化趋势,并指出引气混凝土的含气量不应超过2.3%。

收稿日期: 2019-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51168031, 51468039)

同时研究表明,对于水灰比0.27以下的高强混凝土,在不掺引气剂情况下,仍具有非常优良的抗冻性,而对0.40~0.55水灰比的混凝土,在掺入引气剂后,其抗冻性能明显改善,基本上达到了高强混凝土的水平。杨绍明等<sup>[8-10]</sup>重点分析了混凝土冻融破坏机理,指出混凝土在冻融循环作用下,内部毛细孔中的水由于结冰体积发生膨胀,在混凝土抗拉强度值不足以抵抗体积膨胀产生的应力时,其内部便会产生微裂缝,进一步导致混凝土抗剪强度、抗压强度、动弹性模量等参数值严重下降。随着微裂缝的缓慢发展,逐渐贯通,裂缝宽度和深度进一步增加,进而导致混凝土开裂破坏,并在此基础上提出了冻融破坏的3种理论假说:静水压力假说、渗透压假说、和临界饱水假说<sup>[11-12]</sup>。

我国地域广袤,气候及环境差异明显,混凝土耐久性影响因素众多使得不同地区混凝土遭受不同的耐久性损伤。兰州地处我国西北内陆,又属典型盐渍土地区,对该地区混凝土在实际服役下耐久性的研究并进行寿命预测意义重大。如今国内外采用混凝土耐久性寿命的预测方法<sup>[13-20]</sup>大致分为两种:一是加速试验法,这种方法最为常见,方便精确,对于相同试验机理的长期和加速试验,可以通过最小二乘法得到它们的劣化速率,进而得到加速系数进行寿命预测。二是数学模型法,由于混凝土失效过程即是材料性能的劣化过程,所以基于材料性能劣化的数学模型是一种合理有效的寿命预测方法。例如乔宏霞<sup>[19]</sup>针对影响混凝土材料的两个关键指标如质量、动弹性模量,以它们作为退化因素,得到了服役寿命的边缘分布函数,并通过 Copula 函数建立两者之间关系,进而得到了服役寿命的联合分布函数,并对其寿命进行了预测。

基于此,本研究将采用加速试验法,分别在室内进行冻融循环试验和在室外进行现场暴露的基础上,通过其性能

劣化指标得到室内外试验的加速倍数,进而由室内冻融循环得到的混凝土试件破坏时间,从而计算现场暴露环境下不同配合比混凝土的寿命,为该地区基础设施建设提供理论指导。

## 1 试验情况

### 1.1 原材料及配合比

本试验混凝土所用原材料主要包括:白银水泥厂生产的祁连山牌 P·I 42.5 级水泥,其性能指标见表 1。粗、细集料均由兰州公司提供,其中细集料的细度模数为 2.6,属于中砂。粉煤灰采用性能良好的 II 级粉煤灰,产自兰州二热厂。减水剂由兰州华陇商混凝土公司提供的羟系减水剂,减水率在 17%~18%之间。水使用自来水,水质符合 GJG 63—2006《混凝土拌和用水标准》的要求。

表 1 P·I 42.5 级水泥的各项性能指标

| 原材料 | 凝结时间/min |     | 安定性 | 抗压强度/MPa |      | 抗折强度/MPa |      |
|-----|----------|-----|-----|----------|------|----------|------|
|     | 初凝       | 终凝  |     | 3 d      | 28 d | 3 d      | 28 d |
| 水泥  | 158      | 245 | 合格  | 17.2     | 46.8 | 3.77     | 6.52 |

表 2 混凝土配合比设计

| 试件编号      | 水泥/(kg/m <sup>3</sup> ) | 水/(kg/m <sup>3</sup> ) | 砂/(kg/m <sup>3</sup> ) | 石/(kg/m <sup>3</sup> ) | 粉煤灰/(kg/m <sup>3</sup> ) | 减水剂/(kg/m <sup>3</sup> ) | 水胶比  |
|-----------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|------|
| DR-1/BL-1 | 300                     | 170                    | 655                    | 1 165                  | 100                      | 7.0                      | 0.43 |
| DR-2/BL-2 | 360                     | 158                    | 650                    | 1 165                  | 90                       | 9.5                      | 0.35 |
| DR-3/BL-3 | 425                     | 150                    | 655                    | 1 170                  | 75                       | 12.3                     | 0.30 |

### 1.2 试验方案的设计

为了对比混凝土在室内冻融循环条件下和室外暴露环境下的侵蚀情况,并进行混凝土寿命预测,设计了室内冻融循环试验和室外暴露侵蚀试验,分析其在两种环境下混凝土的耐久性能。混凝土室内冻融试验是指达到龄期的硬化混凝土浸水饱和后,在温度正负交替变化时,使混凝土内部孔隙水结冰,产生膨胀应力,且冻结和融化的交替出现又产生疲劳应力,从而使混凝土由表及里逐渐剥蚀,直至破坏。本次冻融循环试验依照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》。又因为室内试验影响因素过于单调,考虑到混凝土的实际服役环境,本试验同时进行了室外暴露试验,将试块埋于具有典型盐渍土的兰州地区。室外暴露试验更加贴近真实环境,是包括冻融循环、干湿循环、氯盐和硫酸盐侵蚀的多因素复杂环境,这一对比试验弥补了室内试验的单一性,而冻融循环试验作为室内标准试验之一,故将其与室外暴露试验对比得出加速系数  $K$  这一方法是可行的。整个试验过程中,选取相对质量评价参数  $\omega_a$ 、相对动弹性模量评价参数  $\omega_b$  和综合评价参数  $\omega^{PI}$ 。其计算式如下:

$$\omega_a = \frac{M_r - 0.95}{0.05} \quad (1)$$

式中: $M_r$ ——埋置一定时间后试块的相对质量。

$$\omega_b = \frac{E_r - 0.6}{0.4} \quad (2)$$

式中: $E_r$ ——埋置一定时间后试块的相对动弹性模量。

$$E_r = \frac{V_t^2}{V_0^2} \quad (3)$$

式中: $V_0$ ——试件初始超声波波速;

$V_t$ ——一定暴露时间后超声波波速。

$$\omega = \begin{cases} -(A\omega_1^2 \times B\omega_2^2) & (\omega_1 < 0, \omega_2 < 0) \\ A\omega_1^2 \times B\omega_2^2 & (\omega_1 > 0, \omega_2 > 0) \end{cases} \quad (4)$$

### 1.3 试验过程

试验采用 3 组配合比 100 mm×100 mm×400 mm 尺寸的试件,分别对室内、室外试件就质量,相对动弹性模量及综合评价指标进行混凝土耐久性的分析。室内冻融试验在冻融循环箱内进行,首先,将混凝土试件标准养护 28 d,即达到设定标准龄期,再将试件浸泡在 15~20 °C 的水中,直至饱和状态,并达到恒重标准(浸泡时间最少 4 d)。然后将所有混凝土试块置于微机控制快速冻融试验仪中进行试验,根据混凝土耐久性规范的试验要求,每冻融循环 25 次,分别测量试块的质量和超声波等数据,得到相对质量评价参数  $\omega_a$  和相对动弹性模量评价参数  $\omega_b$ 。当质量损失率达到 5%或相对动弹性模量低于初始值的 60%时,即判定试件达到破坏。

盐渍土地区混凝土的耐久性能受到土壤中腐蚀性离子的影响,本试验在进行室内冻融循环试验的同时设计了室外暴露试验,埋置点选在具有典型盐渍土特性的兰州地区,其埋置点土壤中腐蚀性离子的种类及含量如表 3 所示。将 3 组不同配合比的 100 mm×100 mm×400 mm 混凝土试件两端分别标记为 A 端和 B 端,并将 A 端埋置于土中约 200 mm。每经过一定时间的侵蚀作用,通过分别测定试件两端的超声声速值及整个试件的质量得到其评价参数  $\omega_a$  和  $\omega_b$ ,来评定混凝土耐久性的变化,并进行寿命预测。

## 2 试验结果分析

### 2.1 不同水胶比下混凝土冻融循环结果分析

将各配合比试件置于冻融循环机中进行试验,其在不

表3 试件埋设点的土质分析

| 序号 | 项目                            | 检验结果                         |                          |        |
|----|-------------------------------|------------------------------|--------------------------|--------|
|    |                               | 毫摩尔量/(mmol/kg <sub>±</sub> ) | 质量/(mg/kg <sub>±</sub> ) | 百分含量/% |
| 1  | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | 0                            | 0                        | 0      |
| 2  | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 25.19                        | 1 689                    | 0.138  |
| 3  | Cl <sup>-</sup>               | 29.26                        | 1 053                    | 0.105  |
| 4  | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 8.56                         | 836                      | 0.082  |
| 5  | Ca <sup>2+</sup>              | 7.34                         | 293                      | 0.029  |
| 6  | Mg <sup>2+</sup>              | 6.15                         | 158                      | 0.019  |

同循环次数下各评价指标变化规律如图1~3所示,冻融循环试验结束后试件表面破坏形态如图4所示。

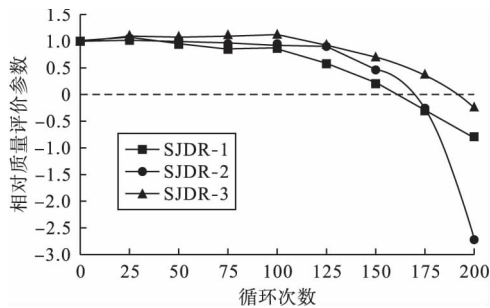


图1 室内冻融循环条件下相对质量评价参数  $\omega_a$

由图1可以看出,不同水胶比试件的相对质量评价参数  $\omega_a$  在30次循环之前都有不同程度的增长,随后呈下降趋势,直至负值。从整体相对质量参数对比可以得出,水胶比最小的 SJDR-3,其  $\omega_a$  值下降最缓慢,且在大约100次循环时出现了整个循环中的最高峰值点,达到了1.1,并在经过约190次循环后达到破坏。相反水胶比最大的 SJDR-1,其  $\omega_a$  值下降最快,且在经过约160次循环后达到破坏。SJDR-2 则介于两者之间,在170次循环左右达到失效状态。

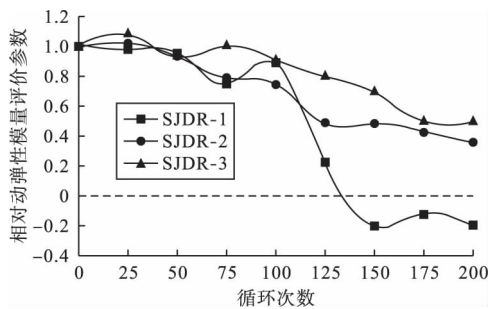


图2 室内冻融循环条件下相对动弹性模量评价参数  $\omega_b$

由图2可以看出,从整体趋势来看,SJDR-3组的  $\omega_b$  值一直略高于其他两组,在大约50次循环的时候,3组试件的  $\omega_b$  值十分接近,几乎交于一点,随后 SJDR-3 组的  $\omega_b$  值开始上升,SJDR-1 和 SJDR-2 则呈下降趋势。SJDR-3 组的  $\omega_b$  值在经历了75次循环后达到了1.000,此时 SJDR-1 和 SJDR-2 的  $\omega_b$  值分别为0.750和0.788。大约100次循环后,SJDR-1 的  $\omega_b$  值急剧下降,当循环次数达到130左右时,SJDR-1 的  $\omega_b$  值下降至0以下,150次以后有些许回升,此时 SJDR-1 组的试件已经进入失效状态。而相比较 SJDR-1 组的急剧下降段,其余两组都呈平稳的波动式下降。当冻融的次数达到大约200次时,SJDR-2 组和 SJDR-3 组的  $\omega_b$  值仍为正值,分别为0.365和0.492。由此可以得出,在冻融过

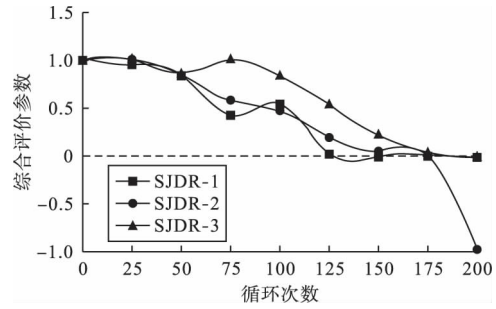


图3 室内冻融循环条件下综合评价参数  $\omega$



图4 冻融结束后各试件表面形态

程中,试件的  $\omega_b$  值总是有不同程度降低,但水胶比越小的试件其抗冻性越好,水胶比最小的 SJDR-3 组试件的  $\omega_b$  值一直维持在比较高的水平,在200次循环后也保持在0.492。

由图3可以看出,在50次循环以前,3组试件的  $\omega$  值差别不大,并在50次循环左右几乎达到同一数值。随后 SJDR-3 组的  $\omega$  值有所回升,直到75次左右循环时达到峰值点,其值在1附近,而此时 SJDR-1 和 SJDR-2 的  $\omega$  值不同程度地下降到0.42和0.58。SJDR-3 的  $\omega$  值总是略高于其他两组试件,下降趋势平缓,在大约190次循环后进入失效状态。SJDR-2 组的  $\omega$  值下降也较为平缓,但下降的幅度要比 SJDR-3 组的大,并在170次循环左右达到破坏。SJDR-1 的  $\omega$  值呈波动式下降,在经历大约125次循环后破坏失效。总体来看,水胶比最小的 SJDR-3 组试件的抗冻性能整体高于其他两组,其抵抗冻融循环的能力相比于大水胶比的 SJDR-1 组有较大的提高。

根据 Powers 在1945年提出的静水压力学说,认为粗骨料与胶凝材料之间存在必不可少的空隙,分布有较多的毛细通道,而这些通道中的水会在外界温度达到冰点以下时结冰膨胀,从而产生静水压力。具体过程表现为试块在受冻时,若含水量高,则毛细孔内的部分水开始冻结。因为冰相较于之前同质量水的密度要小,故引起体积膨胀,未冻结的水分及气体在这种膨胀力驱使下,向周围的气孔移动,从而产生静水压力。更形象的说,冻融循环如同一个高效的泵,称之为微冰晶泵,受冻时,促使未冻水从凝胶孔向微冰晶形成区域移动;升温时,又会吸收外部可利用的水分。因此在多次冻融循环作用下,会导致孔隙的饱和度不断增大,最终当饱和度超过极限充水程度的时候混凝土便会破坏。由图1~3可以看出,SJDR-3 组的试件明显比其他两组更晚



进入失效状态,这是由于水胶比小的试件水含量少,水泥水化后内部空隙少,且胶凝材料的黏结力大,因此结冰膨胀达到损伤破坏比其他两组要更困难,经历更长时间。

## 2.2 不同水胶比下混凝土现场暴露结果分析

对现场暴露环境下混凝土试件进行无损检测,其在不同暴露时间段内性能变化规律如图 5~7 所示。

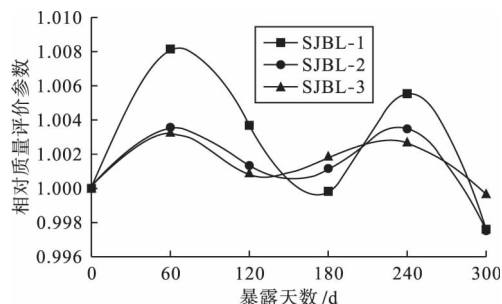


图 5 现场暴露条件下两端相对质量评价参数  $\omega_a$

从图 5 可以看出,不同水胶比试件的  $\omega_a$  值在 60 d 之前都有不同程度的增长,但增长量都很小,并且都在 60 d 时达到峰值点,其值分别为 1.008 1、1.003 5、1.003 2。SJBL-1 组整体波动较大,波峰与波谷之间的差值比其他两组明显。不同水胶比试件的  $\omega_a$  值虽然都有上下的波动,但波动值很小,可忽略不计,现场暴露下的试件质量基本不发生变化,表明试件受侵蚀作用小。

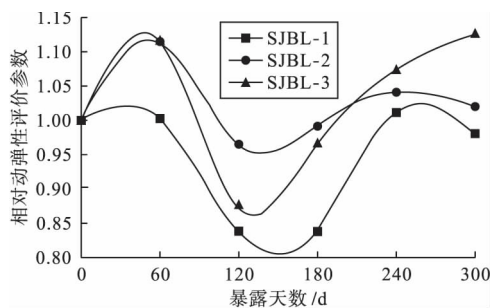


图 6 现场暴露条件下相对动弹性模量评价参数  $\omega_b$

由图 6 可以看出,在室外暴露环境下,不同水胶比混凝土试件的相对动弹性模量变化较为明显,他们的  $\omega_b$  值在 150 d 前都有不同程度的下降,之后一段内又都有所增长。SJBL-1 相比较于其他两组的变化最为显著,并在暴露 180 d 时达到最低点,其  $\omega_b$  值为 0.836,随后有所回升。整个暴露过程中波动最小的是 SJBL-2 组试件,在暴露 60 d 时,其  $\omega_b$  值为 1.113。第 300 d 时测得的 SJBL-1、SJBL-2、SJBL-3 组试件的  $\omega_b$  值分别为 0.980、1.019、1.124。

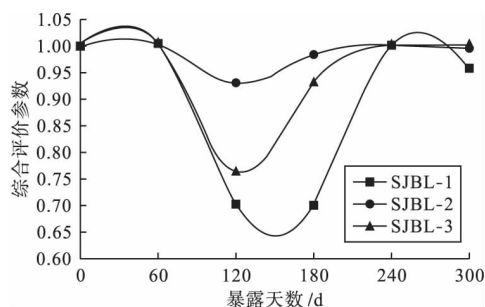


图 7 现场暴露条件下综合评价参数  $\omega$

由图 7 可以看出,SJBL-1 和 SJBL-3 组的试件在暴露

过程中的  $\omega$  值变化较大,而 SJBL-2 组试件基本保持在 1.00 上下,波动不大。在暴露约 180 d 时,SJBL-1 组试件的  $\omega$  值达到最低点,为 0.699。而 SJBL-3 组试件的  $\omega$  值在 120 d 时达到波谷值 0.76,SJBL-2 组试件在 120 d 的最低值为 SJBL-3 组的 1.2 倍。整个过程中,3 组试件在 120 d 内都有不同程度的下降,表明试件内部开始出现裂缝,在随后 120 d 内都增长至 1.00。至 300 d 时,3 组试件的  $\omega$  值下降都不明显,在 0.95~0.99 之间。

综合各评价指标可以观察到现场暴露条件下,不同水胶比的混凝土试件在整个暴露过程中均表现出了相似的劣化特征,即初始强化,随之缓慢劣化,最后加速劣化。究其原因主要是初期土质中的腐蚀性离子通过混凝土固有的微裂缝及毛细微孔进入试件内部,发生化学反应生成钙矾石、石膏等物质。同时,冻融循环使得混凝土内部由于受冻产生了负压,使得腐蚀性介质更易进入混凝土内部,而初期试件整体性较好,受到的损伤还不至于使混凝土表层起皮、掉渣,导致试块在宏观上质量表现为增加。随着外界离子侵入的越来越多,在混凝土内部生成的腐蚀产物也越来越多,产生了较大的膨胀压力,加之干湿循环和反复的冻融作用,使得原本微小的毛细孔和微裂缝逐渐扩大、连通,内部腐蚀性产物从这些孔道中溶解、析出,试件质量开始小幅减小。外界离子的持续进入,冻融、干湿等环境因素形成了连锁反应,相互作用,加速恶化了服役环境,孔洞越来越大,试件内的胶凝物质和腐蚀和腐蚀产物溶出的越来越多,试件出现大面积的起皮、掉渣和剥落,进而造成了质量的加速减少。

## 3 混凝土耐久性评价及寿命预测

本研究采用快速试验法进行寿命预测,通过相同配合比的室外长期暴露试验和室内加速试验,从而得到两者的劣化速率,并采用最小二乘法得到加速系数  $K$ 。通过合理的加速系数得到实际服役环境下混凝土耐久性寿命。该方法得到结果较为准确,而且相对其他方法来说容易实现。

### 3.1 水胶比 0.43 组试件的寿命预测

由图 3 可以看出,水胶比 0.43 组的试件在冻融条件下最先达到破坏,而且破坏最为明显。通过对比室外埋设混凝土的数据发现,当 300 d 时测得其  $\omega$  值在 0.956 8,并未进入失效状态。利用相应的数学工具,对各组试件不同条件下的评价参数  $\omega$  进行拟合,为了保证曲线符合实际,选择合适的单调递减函数,通过对拟合函数分析,可以得到加速系数  $K$ 。

对于 SJDR-1 组试件,由图 8 可以看出加速系数  $K_1$  随  $\omega$  的变化,其中  $K_1=391.954 8 \times (0.908 23-t)/(1.059 82-t)$ ,当混凝土试件的  $\omega$  值达到零时,即进入失效状态,冻融循环条件下与室外暴露条件下的加速系数  $K_1$  的值为 335.892 0。由于冻融循环的周期为 4 h,所以 SJDR-1 组试件进入失效状态需要经历 156 次循环,换算成时间为  $T_1=26$  d。

换言之相同配合比的试件在室外暴露条件下需要经历

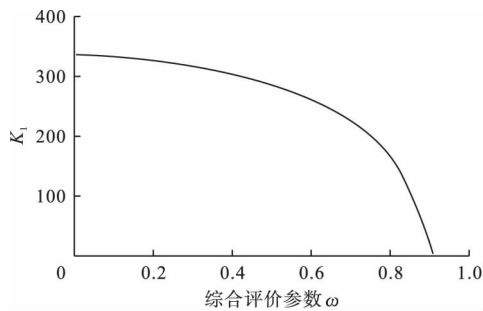


图8 加速系数  $K_1$

25.35 年达到破坏。

$$N_1 = K_1 \times T_1 = 355.892 \ 0 \times 26 \ d = 9 \ 253.192 \ d = 25.35 \ 年 \quad (5)$$

### 3.2 水胶比 0.35 组试件的寿命预测

对 SJDR-2 组试件,其加速系数  $K_2$  随  $\omega$  变化如图 9,其中  $K_2 = 530.636 \ 6 \times (1.000 \ 64 - t) / (1.096 \ 62 - t)$ ,混凝土达到失效时,冻融循环条件和室外暴露条件下的加速系数为 484.193 4。从图 3 可以看出,SJDR-2 组试件在经历了 177 次循环即  $T_2 = 29.5 \ d$  后达到破坏,同理得出相同配合比的试件在室外暴露条件下需要经历 39.13 年达到破坏。

$$N_2 = K_2 \times T_2 = 484.193 \ 4 \times 29.5 = 14 \ 283.705 \ 3 \ d = 39.13 \ 年 \quad (6)$$

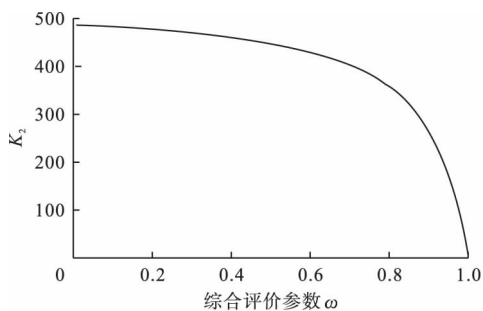


图9 加速系数  $K_2$

### 3.3 水胶比 0.3 组试件的寿命预测

对于 SJDR-3 组试件,其加速系数  $K_3$  随变化如图 10,其中:  $K_3 = 704.194 \ 2 \times (1.000 \ 43 - t) / (1.188 \ 33 - t)$ 。由图 10 可以看出,其冻融循环条件和室外暴露条件下的加速系数  $K_3$  为 592.846 3。从图 3 可以得到 SJDR-3 组混凝土试件在经历了 192 次循环后达到破坏,换算成时间就是经历了  $T_3 = 32 \ d$  冻融循环后达到破坏。可以得出,相同配合比的试件在室外暴露条件下需要经历 51.98 年达到破坏。

$$N_3 = K_3 \times T_3 = 592.846 \ 3 \times 32 \ d = 18 \ 971.081 \ 6 \ d = 51.98 \ 年 \quad (7)$$

## 4 结论

本研究针对影响混凝土耐久性的关键因素,设计室内冻融循环试验,并与室外现场暴露下的试件进行对比。通过测试质量损失,相对动弹性模量(超声波)来反映混凝土质量损失率和相对密实度的损失,并判断是否进入破坏状态,进而对混凝土的耐久性寿命进行初步预测,得到结论如下:

(1) 由室内冻融循环试验和室外暴露试验可以得到寿命预测系数  $K$ ,且  $K$  值是关于综合评价参数  $\omega$  的一个函数。

(2) 通过加速系数  $K$  和室内冻融循环试验得到的试件破坏时间,得到现场暴露环境下 0.30、0.35、0.43 水灰比的

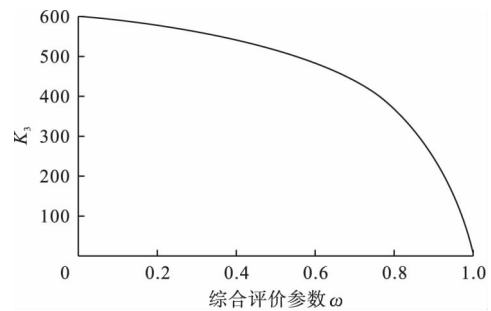


图10 加速系数  $K_3$

试件分别在 51.98、39.13、25.35 年达到破坏,水胶比越小其抵抗侵蚀作用越强,服役寿命越长。

(3) 室外暴露条件下,不同配合比混凝土的相对质量评价参数  $\omega_a$ ,相对动弹性模量评价参数  $\omega_b$  和综合评价参数  $\omega$  都有不同程度的波动,但整体呈下降趋势,这是外界腐蚀性离子在混凝土中生成膨胀产物和气候变化形成冻融、干湿循环共同作用的结果。

### 参考文献:

- [1] 张亮,严建军,李响.混凝土结构耐久性的研究综述[J].材料导报,2013,27(S1):294-297.
- [2] 郑元勋,杨培冰,康海贵.冻融环境下混凝土结构耐久性研究综述[J].郑州大学学报(工学版),2016,37(5):27-32.
- [3] 程云虹,陈东华,王元.混凝土抗冻性与水泥用量关系的试验研究[J].建筑材料学报,2011,14(4):436-440.
- [4] 王庆石,王起才,张凯,等.不同含气量混凝土的孔结构及抗冻性分析[J].硅酸盐通报,2015,34(1):30-35.
- [5] 彭辉,杨海宁,刘绍林.低强度抗冻抗渗混凝土配合比设计及其力学特性[J].煤炭学报,2012,37(7):1123-1128.
- [6] 张向东,李庆文,李广华,等.防冻剂对混凝土引气剂气泡稳定性影响研究[J].功能材料,2015,23(46).
- [7] 李雪峰,付智.低气压环境对混凝土含气量及气泡稳定性的影响[J].硅酸盐学报,2015,43(8):1076-1082.
- [8] 杨绍明,周双喜.混凝土抗冻性试验方法及其评价参数的探讨[J].混凝土,2008,222(4):27-28.
- [9] 杨全兵.混凝土盐冻破坏机理(II):冻融饱水度和结冰压[J].建筑材料学报,2012,15(6):741-746.
- [10] 杜鹏,姚燕,王玲,等.冻融循环与氯盐侵蚀作用下混凝土的损伤模型[J].硅酸盐通报,2014,4(33).
- [11] 慕儒,缪昌文,刘加平,等.氯化钠、硫酸钠溶液对混凝土抗冻性的影响及其机理[J].硅酸盐学报,2001(6):523-529.
- [12] 慕儒,田稳苓,周明杰.冻融循环条件下混凝土中的水分迁移[J].硅酸盐学报,2010,38(9):1713-1717.
- [13] 严佳川,邹超英.冻融循环作用下混凝土材料寿命评估方法[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(6):11-15.
- [14] 余红发,孙伟,张云升,等.在冻融或腐蚀环境下混凝土使用寿命预测方法 I-损伤演化方程与损伤失效模式[J].硅酸盐学报,2008,36(S1):128-135.
- [15] 乔宏霞,朱彬荣,路承功.基于 Copula 函数的现场暴露混凝土寿命预测方法[J].建筑材料学报,2017,20(2):191-197.

·下转第 156 页

坏,但是剥离时的承载力显著高于对照组试验承载力。

(3)CFRP 网格增强无机磷酸盐水泥基复合材料加固方法效果显著,与空白对照组相比,加固后的混凝土板开裂荷载提高了 133%,极限荷载提高了 108%。

#### 参考文献:

- [1] 张晓虎,孟宇,张炜.碳纤维增强复合材料技术发展现状及趋势[J].纤维复合材料,2004(1):50-53,58.
- [2] 雷瑞,郑化安,付东升.高性能纤维增强复合材料应用的研究进展[J].合成纤维,2014,43(7):37-40.
- [3] CAO S H,WU Z S,WANG X.Tensile properties of CFRP and hybrid FRP composites at elevated temperatures[J].Journal of Composite Materials,2009,43(4):315-330.
- [4] FANG H,ZOU F,LIU W Q,et al.Mechanical performance of concrete pavement reinforced by CFRP grids for bridge deck applications[J].Composites Part B:Engineering,2017(110):315-335.
- [5] 林秋峰.高强钢丝网聚合物砂浆加固混凝土梁抗弯试验研究[D].

- 福州:福州大学,2006.
- [6] 荀勇,支正东,张勤.织物增强混凝土薄板加固钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(3):70-76.
  - [7] 王文炜.纤维复合材料加固钢筋混凝土梁抗弯性能研究[D].大连:大连理工大学,2003.
  - [8] 汪宏涛.高性能磷酸镁水泥基材料研究[D].重庆:重庆大学,2006.
  - [9] 杨楠.磷酸镁水泥基材料黏结性能研究[D].长沙:湖南大学,2014.
  - [10] 刘凯,李东旭.磷酸镁水泥的研究与应用进展[J].材料导报,2011,25(13):97-100.

---

第一作者: 吴万开(1994-),男,硕士生,主要从事磷酸盐水泥基材料研究。

联系地址: 江苏南京市浦口区浦珠南路30号 南京工业大学土木工程学院(211816)

联系电话: 13770635632

通讯作者: 方海(1981-),男,教授,研究方向:复合材料结构。

联系电话: 13584061461

---

#### ·上接第 152 页

- [16]余红发,孙伟,鄢良慧,等.混凝土使用寿命预测方法的研究 I:理论模型[J].硅酸盐学报,2002,30(6):686-695.
- [17]JIANG L H,LIN B Y,CAI Y B.A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete[J].Cement and Concrete Research,2000,30(5):699-702.
- [18]BHARFAVA K,GHOSH A K,MERI Y,et al.Modeling of time to corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures[J].Cement and Concrete Research,2005,35(11):2203-2218.
- [19]BHARGAVA K,GHOSH A K,MORI Y,et al.Model for cover cracking due to rebar corrosion in RC structures[J].Engineering Structures,2006,28(8):1093-1109.
- [20]PREZZI M,GEYSKENS P,MONTEIRO J M.Reliability approach to

service life prediction of concrete exposed to marine environment[J].ACI Materials Journal,1996,93(6):544-551.

- [21]乔宏霞,路承功,李宇,等.宁夏盐渍土地区现场暴露混凝土耐久性损伤评价试验[J].建筑科学与工程学报,2016,33(6):44-52.

---

第一作者: 乔宏霞(1977-),女,教授,博士生导师,研究方向为混凝土结构耐久性及其寿命预测。

联系地址: 甘肃省兰州市七里河区兰工坪路287号 兰州理工大学校本部(730050)

联系电话: 13519694265

通讯作者: 郭飞(1993-),女,硕士,主要从事混凝土耐久性性能方面研究。

联系电话: 18298402834

---

#### 行业资讯

#### 中国建筑业协会主办的建筑业抗击新冠肺炎疫情系列公益直播讲座圆满结束

为深入贯彻习近平总书记关于抗击新冠肺炎疫情的系列重要讲话精神,认真落实党中央、国务院的决策部署,帮助会员企业做好建设工程项目防疫工作,推动企业科学有序复工复产,中国建筑业协会自3月12日起举办抗击疫情、‘建’行使命——建筑业抗击新冠肺炎疫情系列公益直播讲座。公益直播讲座分别于3月12日、3月19日、3月25日、4月2日连续举办了4期,网络观看量约262470人次。

第一期由中国建筑业协会副会长吴慧娟主持,邀请住房和城乡建设部建筑市场监管司施工处李雪飞处长,主要对近期全国房屋建筑和市政基础设施工程复工复产总体情况、新冠肺炎疫情对建筑业发展的主要影响、住房和城乡建设部相关政策措施做了讲解。

第二期公益直播讲座邀请北京大成律师事务所高级合伙人、《中国建筑业》法律顾问王登山律师,从建设工程施工合同视角解析疫情引发的施工企业法律风险及防范措施。

第三期公益直播讲座邀请中铁建设集团有限公司、北京市第三建筑工程有限公司、宁波市政工程建设集团股份有限公司,分别介绍央企、地方国企、民营企业在疫情期间做好“控疫情”和“促生产”工作情况。

第四期公益直播讲座联合中国建设报社共同举办,中国建筑业协会副会长兼秘书长刘锦章和中国建设报社社长王胜军分别致辞,中国建筑第二工程局有限公司、中国中铁四局集团有限公司、中交第二航务工程局有限公司和江苏中南建筑产业集团有限责任公司等四家企业分别交流了在疫情期间信息宣传工作方面的典型经验。

系列公益直播讲座为建筑行业在抗击新冠肺炎疫情、企业复工复产工作提供了有力的支持和帮助,受到了广大建筑业企业的好评。