

材料单调退化原理下的颗粒料骨架抗冻性试验研究

张佳伦, 张文洋, 王慧东

(石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要:研究依托雄安新区荣乌高速项目,开展高性能纤维混凝土的抗冻试验研究,定量分析不同水胶比和矿物掺合料掺量对抗冻质量损失和相对动弹性模量等表征参数的影响,并借助Wiener函数对混凝土的抗冻性进行可靠度评价。结果表明,在抗冻性中,随着冻融循环次数的增加,抗冻质量损失率和相对动弹性模量损失率逐渐升高;水胶比的增大使其抗冻质量损失率和相对动弹性模量损失率逐渐变大,而矿物掺合料掺量的增大会使其抗冻质量损失率和相对动弹性模量损失率逐渐变小;借助Wiener随机过程的退化理论分析,在抗冻质量损失中,水胶比与抗冻性成反比,矿物掺合料掺量与抗冻性成正比。上述研究成果对荣乌高速的装配式梁板体系混凝土应用提供了科学的理论支撑和技术指导。

关键词:混凝土;抗冻性;Wiener函数;可靠度评价;水胶比;矿物掺合料

中图分类号: TU502 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)01-0041-07

在中国北方寒冷地区混凝土经常发生冻融破坏,混凝土冻融破坏是影响混凝土耐久性问题的主要因素之一^[1]。混凝土冻融破坏会使混凝土结构的服务寿命变短,不仅造成极大的经济损失还会引发工程安全事故^[2]。鉴于此,国内外学者针对混凝土的冻融破坏方面进行了大量研究分析^[3-7]。但就现有研究表明混凝土在长期使用过程中仍然具有耐久性差、强度发展慢、影响建筑结构使用寿命等一系列问题。因此研究混凝土的冻融破坏依然是工程所面临的重要问题。

荣乌高速公路新线工程项目对雄安新区的建设具有重大意义,对混凝土的耐久性要求严格,而在北方其耐久性主要体现在混凝土的冻融破坏上。基于此,通过不同水胶比和矿物掺合料掺量对混凝土的抗冻质量损失和相对动弹性模量进行试验,运用定量分析方法和Wiener函数进行研究分析。基于Wiener函数的随机过程能够较好地反映产品性能的退化过程,因此被广泛应用于产品性能的退化建模分析中,此模型主要用于对电子产品的可靠度评价,对混凝土可靠度评价的应用较少,因此由Wiener函数对混凝土的耐久性进行可靠度评价具有重要的研究意义。研究为荣乌高速混凝土建筑的耐久性提供了理论和技术支撑,同时对混凝土的长期性能研究进行了重要补充。

1 单调退化原理

Wiener过程又称为布朗运动,是一个初值为零、时间连续且具有独立平稳增量的堆积过程,适用于由大量微小损失不断积累,最终导致产品失效的单调退化过程^[8-11]。在本试验中,混凝土耐久性的退化趋势为随机过程,所以混凝土耐久性的退化过程可以用Wiener退化过程来表示,即

$$X(t) = x_0 + \lambda t + \sigma B(t) \quad (1)$$

式中, x_0 为性能退化初始值; λ 为退化速率,表示性能退化的快慢和趋势,当性能退化量呈递增趋势时 $\lambda > 0$,反之 $\lambda < 0$; σ 为扩散速度,表示试验误差和外部干扰等随机因素对性能退化的影响; $B(t)$ 为标准布朗运动^[12]。所以 $X(t)$ 标准正态分布为 $N(x_0 + \lambda t, \sigma^2 t)$ 。

收稿日期:2022-10-23 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.20220322

作者简介:张佳伦(1997—),男,硕士研究生,研究方向为桥梁施工技术与线形监控。E-mail:741380609@qq.com

张佳伦,张文洋,王慧东.材料单调退化原理下的颗粒料骨架抗冻性试验研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(1):41-47.

设混凝土的失效阈值为 n , 当混凝土抗冻性的抗冻质量损失率达到 5%、相对动弹性模量损失达到 40% 时, 混凝土试件失效, 即寿命达到最大值^[13]。当混凝土在 t 时耐久性退化量 $X(t)$ 首次达到 n 时, 即可认为混凝土试件破坏, 其寿命 T 为

$$T=\inf\{t|X(t)\geqslant n\} \tag{2}$$

由推导可知, 混凝土试件退化量的剩余寿命可靠度函数为

$$R(t)=1-\phi\left(\frac{n-\lambda t}{\sigma_b\sqrt{t}}\right)+\exp\left(\frac{2\lambda n}{\sigma_b^2}\right)\phi\left(\frac{-n-\lambda t}{\sigma_b\sqrt{t}}\right) \tag{3}$$

式中, $\phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

根据概率密度函数公式, 可得到似然函数为

$$N(\lambda,\sigma_b^2)=\prod_{i=1}^n\prod_{j=1}^m\frac{1}{\sqrt{2\sigma_b^2\Delta t_{ij}}}\exp\left[-\frac{(\Delta x_{ij}-\lambda\Delta t_{ij})^2}{2\sigma_b^2\Delta t_{ij}}\right] \tag{4}$$

式中, λ 为总体寿命分布均值的估计值; σ_b^2 为总体寿命分布方差的估计值。

运用极大似然估计法得出, 试件耐久性退化 Wiener 过程参数表示为

$$\lambda=\frac{\sum_{i=1}^nx_{im}}{\sum_{i=1}^nt_{im}} \tag{5}$$

2 试验方案设计

试验通过对混凝土抗冻质量损失和相对动弹性模量的监测来获得不同掺量和不同冻融次数的影响程度, 见图 1。

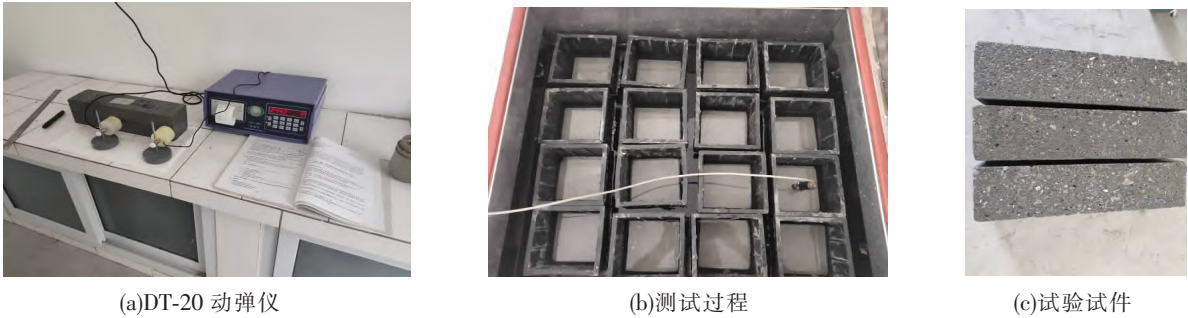


图 1 混凝土冻融循环试验

试验采用定量分析的方式, 以 C30 混凝土配合比设计为基准, 设计 0.35、0.40、0.45 的 3 种不同水胶比及 20%、25%、30% 的 3 种不同矿物掺合料掺量, 系统研究水胶比和矿物掺合料对混凝土抗冻质量损失和相对动弹性模量的影响规律。其中, 试验所采用的水泥为普通硅酸盐水泥、粉煤灰为 I 级粉煤灰、矿渣粉为 95 级矿渣粉、减水剂为聚羧酸型减水剂、细集料为河砂、纤维为聚丙烯纤维^[14], 具体配合比见表 1。

表 1 试验颗粒料骨架配比

编号	各项材料用量/(kg·m ⁻³)								水胶比	矿掺掺量/%
	水泥	砂	粉煤灰	矿渣粉	石子	水	减水剂	纤维掺量		
A ₁	280.0	736.0	60.0	60.0	1 004.0	160	4.0	1.1	0.40	30
A ₂	300.0	736.0	50.0	50.0	1 004.0	160	4.0	1.1	0.40	25
A ₃	320.0	736.0	40.0	40.0	1 004.0	160	4.0	1.1	0.40	20
A ₄	365.0	713.2	46.0	46.0	1 069.8	160	4.6	1.1	0.35	20
A ₅	284.8	753.6	35.6	35.6	1 130.4	160	3.6	1.1	0.45	20

3 混凝土冻融循环试验结果与分析

冻融循环后,对混凝土试件进行抗冻质量损失和相对动弹性模量测定,分别得到其抗冻质量损失和相对动弹性模量。

3.1 水胶比影响因素分析

通过对不同水胶比、矿掺掺量的试件进行冻融循环处理,其抗冻质量损失率和相对动弹性模量随循环次数的变化如图 2 所示。

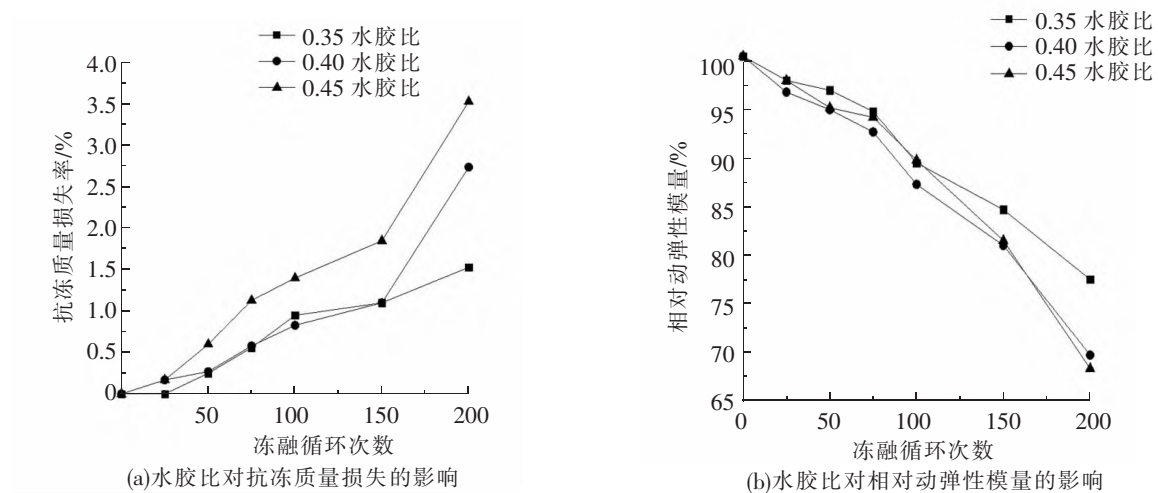


图 2 水胶比对冻融循环破坏影响

由图 2 可以看出,随着循环次数的增加,抗冻质量损失和相对动弹性模量损失逐渐增大。当循环次数达到 100 次后,混凝土的抗冻质量损失和相对动弹性模量曲线的变化趋势明显,表明混凝土冻融循环次数达到 100 次时是一个转折点。冻融循环初期,由于混凝土试件中本身有部分缺陷,在冻融循环的作用下内部微裂纹发生了少量的扩展,相对动弹性模量和抗冻质量损失的损伤范围较小;而随着冻融循环次数的增加,冻融条件对混凝土的影响和作用逐渐增强,在旧裂缝持续扩张的同时,又开始有新的裂缝出现,混凝土试件受到破坏的程度逐渐增大,相对动弹性模量及抗冻质量受到破坏的程度和速率也随之增加。

从图 2(a)中可以看出,随着水胶比的增加抗冻质量损失也在不断增加,当冻融循环次数在 200 次时,达到最大,其 0.45 的掺量比 0.35 和 0.40 分别大了 130.7% 和 28.8%,且随着掺量的增加,其增大速率明显变缓。从图 2(b)中可以看出,随着水胶比掺量的增大,其相对动弹性模量损失也在不断变大,且当冻融循环次数达到 200 次时,相对动弹性模量损失达到最大,此时 0.45 的掺量比 0.35 和 0.40 的大了 9.2% 和 1.4%。由此说明,水胶比越低,混凝土的抗冻性能越好。这是因为水胶比低时,混凝土水化反应后剩余的游离水较少,形成的毛细孔隙少,并且混凝土硬化成型后质地密实,渗透性能低,从而使得冻融循环后抗冻质量损失率和相对动弹性模量损失较低,耐久性好。随着水胶比掺量的不断增加,自由水参与水化反应后硬化留下的剩余毛细孔隙变多,毛细孔中剩余可参与冻融循环破坏的自由水也不断变多,抗冻质量损失变大,抗冻质量损失和相对动弹性模量损失率变高。

3.2 矿物掺合料影响因素分析

通过对不同矿物掺合料掺量的试件进行冻融循环处理,其抗冻质量损失率和相对动弹性模量循环次数的变化如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着冻融次数的增加,抗冻质量损失率逐渐增加,相对动弹性模量逐渐减少。当试块冻融循环次数达到 100 次时,图 3 中的曲线变化趋势明显增大,30% 的矿物掺合料掺量分别比 20% 和 25% 掺量的抗冻质量损失率减小了 46.4% 和 21.1%,相对动弹性模量大了 12.3% 和 4.4%。比较图 3 可以发现,随着矿物掺合料掺量的增加,试块的抗冻质量损失率和相对动弹性模量的变化逐渐变缓,在抗冻质量损失中,20% 的掺量比 25% 的掺量增加了 32.1%,而 25% 的比 30% 的只增加了 21.1%。这是因为随着矿物掺合料的掺入,混凝土中出现了火山灰效应和微填充效应^[15],使得混凝土的

密实度进一步增强,同时引起了混凝土内部毛细孔数量和尺寸的改变,导致混凝土外部的自由水难以渗入进去,减少了混凝土中的自由水,从而降低了混凝土的抗冻质量损失率和相对动弹性模量损失。

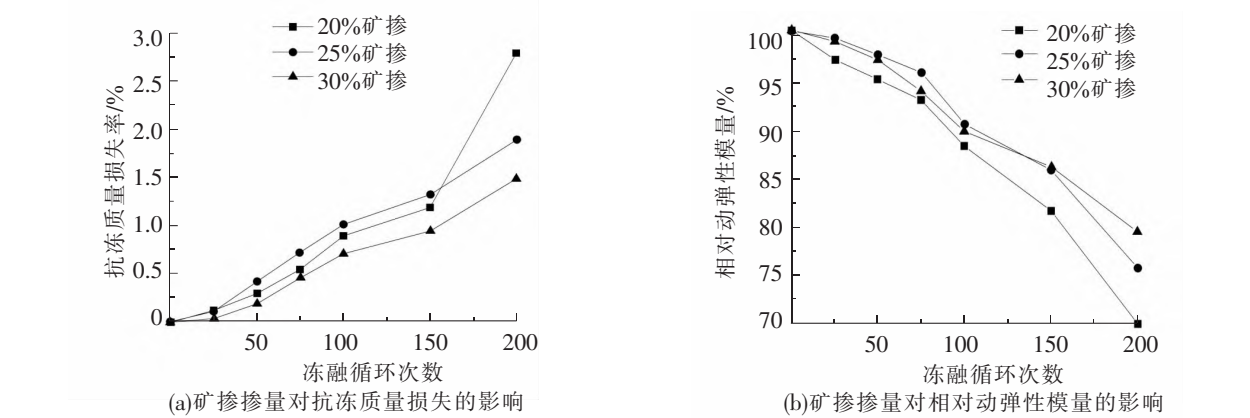


图 3 矿掺掺量对冻融循环破坏影响

3.3 基于 Wiener 随机过程的退化模型分析

以上由定量分析对不同掺量和不同冻融循环次数的混凝土试件进行了简单的分析,为了更好地对混凝土的抗冻性进行研究,采用 Wiener 函数对混凝土的抗冻性进行可靠性评估,从而对混凝土的抗冻性进行深度分析,得出不同条件下混凝土的冻融循环规律。

试验过程中对混凝土的抗冻性进行数据测量,计算得到混凝土的抗冻质量损失和相对动弹性模量,其数据如表 2 所示。

表 2 混凝土抗冻性数据 %

试验 次数	抗冻质量损失率						相对动弹性模量					
	水胶比			矿物掺料掺量			水胶比			矿物掺料掺量		
	0.35	0.40	0.45	20%	25%	30%	0.35	0.40	0.45	20%	25%	30%
0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100
25	0.10	0.17	0.12	0.17	0.11	0.05	98.0	96.9	98.0	96.9	99.2	98.9
50	0.27	0.30	0.58	0.30	0.42	0.20	96.7	94.9	94.0	94.9	97.4	96.9
75	0.54	0.55	1.14	0.55	0.73	0.46	94.5	91.8	89.7	91.8	95.6	93.7
100	0.81	0.90	1.42	0.90	1.01	0.72	89.3	87.9	84.1	87.9	90.2	89.5
150	1.19	1.39	1.96	1.39	1.32	0.96	84.1	81.1	76.6	81.1	85.5	85.7
200	1.64	2.80	3.55	2.80	1.90	1.50	75.2	69.3	68.3	69.3	75.5	79.0

利用统计回归的方法对混凝土的抗冻性进行曲线拟合,其拟合结果见表 3。

表 3 不同阶数拟合优度对比

评价 指标	拟合 阶数	抗冻质量损失率						相对动弹性模量					
		水胶比			矿物掺料掺量			水胶比			矿物掺料掺量		
		0.35	0.40	0.45	20%	25%	30%	0.35	0.40	0.45	20%	25%	30%
R^2 (确定 系数)	1 阶	0.992 9	0.924 0	0.962 7	0.924 0	0.990 1	0.980 7	0.972 6	0.974 8	0.995 4	0.974 8	0.956 5	0.986 3
	2 阶	0.994 3	0.987 1	0.978 8	0.987 1	0.990 2	0.986 4	0.993 0	0.996 8	0.996 8	0.996 8	0.990 6	0.989 7
	3 阶	0.996 7	0.994 6	0.985 7	0.994 6	0.994 5	0.986 6	0.993 9	0.998 9	0.999 9	0.998 9	0.993 9	0.997 4
	4 阶	0.999 5	0.998 1	0.999 4	0.998 1	0.999 9	0.998 6	0.993 3	0.998 7	0.998 9	0.998 7	0.990 7	0.991 0

由表 3 可知,对于抗冻质量损失率,采用四阶函数拟合时其水胶比和矿物掺合料掺量的 R^2 最接近于 1;对于相对动弹性模量,采用三阶函数拟合时其水胶比和矿物掺合料掺量最接近于 1。根据表 3 中的拟合效果,对抗冻质量损失率和相对动弹性模量分别选择四阶函数和三阶函数进行拟合,其拟合效果见图 4。

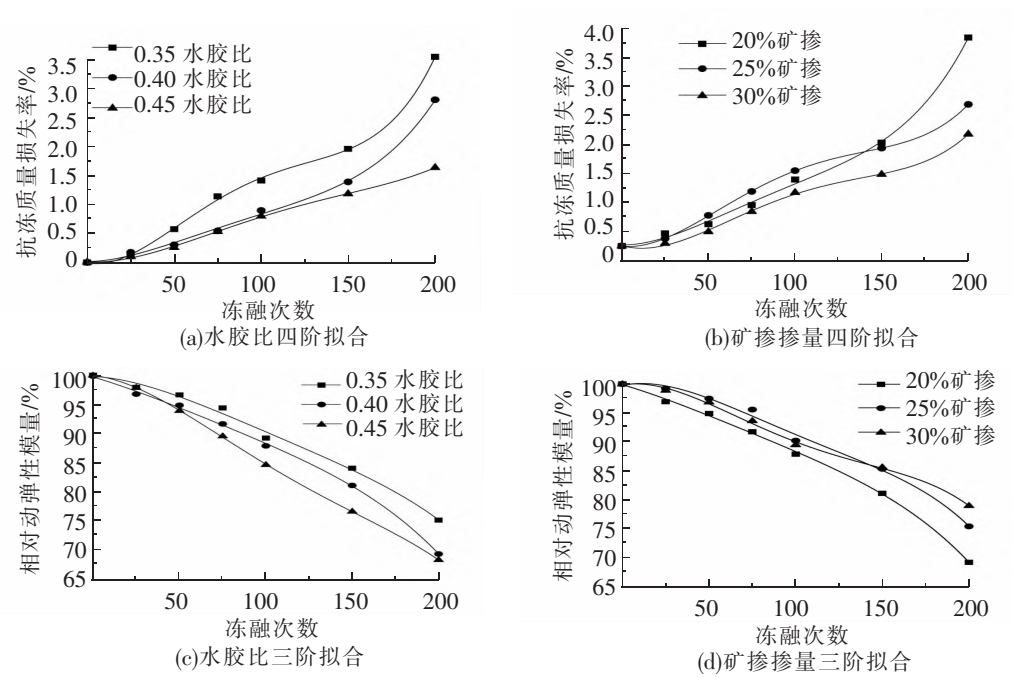


图 4 拟合曲线

由此,根据式(5)可以分别得到水胶比和矿物掺合料掺量在抗冻质量损失和相对动弹性模量的参数估计值,结果见表 4。

表 4 参数估计值

参数 估计 值	抗冻质量损失率						相对动弹性模量					
	水胶比			矿物掺料掺量			水胶比			矿物掺料掺量		
	0.35	0.40	0.45	20%	25%	30%	0.35	0.40	0.45	20%	25%	30%
λ	0.065 6	0.112 0	0.142 0	0.112 0	0.080 0	0.056 0	0.976 0	1.228 0	1.252 0	1.228 0	0.980 0	0.840 0
σ_0^2	0.027 4	0.152 6	0.147 3	0.152 6	0.022 5	0.041 7	7.832 5	12.604 7	9.563 2	12.604 7	9.289 0	4.909 9

将上述参数及失效阈值带入可靠度函数公式中,可以得到其可靠度曲线,如图 5 所示。

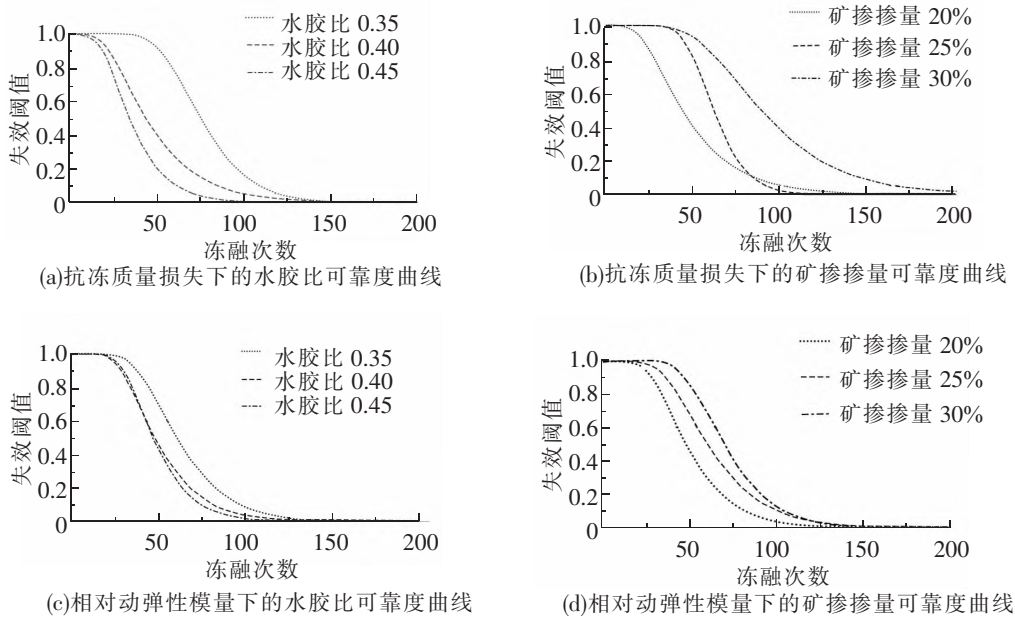


图 5 可靠度曲线图

从图 5 可以看出,水胶比和矿物掺合料掺量的抗冻质量损失和相对动弹性模量随着次数的增加,其耐久性不断降低,最终达到失效阈值而破坏。

由图 5(a)、图 5(b)可以看出,当靠近失效阈值 0.05 时,水胶比和矿掺掺量的次数分别为 130、100、70 和 170、90、100。在水胶比中,当掺量为 0.35 时其曲线在初期时段的延长次数最长,且曲线的整个趋势相比较另外 2 个掺量来说较为平缓,说明当水胶比为 0.35 的时候,对混凝土的耐久性更好。在矿物掺合料中,掺量为 30% 时,曲线在初期时段的延长次数最长,且曲线一直在另外 2 个掺量上方,说明当矿物掺合料掺量为 30% 的时候,混凝土的耐久性最好。

由图 5(c)、图 5(d)可以看出,当水胶比和矿物掺合料掺量的曲线靠近失效阈值 0.6 时,次数分别为 70、50、50 和 50、60、70。在水胶比中,当掺量为 0.35 的时候,其第 1 阶段即初期时段的长度最大,在整个曲线中趋势比其他掺量平缓,且当失效时,也比另外 2 个掺量分别增加了 28.5%。说明当混凝土的掺量为 0.35 时,在相对动弹性模量下,混凝土的耐久性更好。在矿物掺合料掺量中,当掺量为 30% 的时候,其第 1 阶段比 20% 和 25% 的掺量延长次数更多,其失效时分别增加了 28.5% 和 14.3%。因此,在相对动弹性模量下,30% 的矿物掺合料耐久性更好,20% 的更差。

4 结论

以 3 种不同水胶比和矿物掺合料为试验基础,通过定量分析研究水胶比和矿物掺合料掺量对混凝土抗冻质量损失和相对动弹性模量的影响,根据 Wiener 过程的退化分析对混凝土的抗冻性进行可靠度评价。从而得出以下结论:

(1)由定量分析可知,随着冻融循环次数的增加,其抗冻质量损失率和相对动弹性模量损失率逐渐变大,当循环次数达到 100 次后,其损失变化趋势变大。当水胶比为 0.35、矿物掺合料掺量为 30% 时,其抗冻性更好;当水胶比为 0.45、矿物掺合料掺量为 20% 时,其抗冻性更差。

(2)在抗冻性中,随着水胶比的增大其抗冻质量损失率和相对动弹性模量损失逐渐变大,当水胶比为 0.45 时,其抗冻质量损失率增长最大,冻融循环 200 次时,较 0.35 水胶比增大了 130.7%;而随着矿物掺合料掺量的增大,其抗冻质量损失率和相对动弹性模量损失逐渐变小,矿物掺合料掺量为 30% 时,其相对动弹性模量损失最小,冻融循环 100 次时,较 0.35 水胶比增大了 12.3%。

(3)根据数理统计对各因素的拟合效果,在抗冻质量损失率和相对动弹性模量中,水胶比为 0.35 的 R^2 为 0.992 9,矿物掺合料掺量为 25% 的 R^2 为 0.990 1。 R^2 值越接近于 1,则拟合效果越好,拟合度越高,抗冻性越好,混凝土的耐久性就越好。

(4)通过 Wiener 随机过程的退化分析,在抗冻质量损失中,掺量为 0.35 的水胶比和掺量为 30% 的矿掺掺量的失效次数比其他 2 个掺量的水胶比和矿物掺合料要大。说明水胶比越小,矿物掺合料掺量越多,其失效次数越大,抗冻性越好。

参 考 文 献

- [1]李海涛. 新疆维吾尔自治区北部地区输水隧洞混凝土耐久性问题及应对措施[J]. 建筑技术开发, 2018, 45(21): 98-99.
- [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]Duan Guizhen, Fang Congqi. Research progress and new thinking of destruction of concrete due to freeze-thaw cycles[J]. Concrete, 2013, 12(5): 16-20.
- [4]Li Shuguang, Chen Gaixin, Lu Yihui. Evaluation method for freezing-thawing damage in concrete based on quantitative micro crack analysis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(3): 207-212.
- [5]Li Jun, Gao Peiwei, Liu Hongwei, et al. Study on concrete resistance to chloride salt corrosion under full soaking and wet-dry cycling condition[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2017, 41(5): 666-670.
- [6]Liu Zhanqun, Hou Le, Deng Dehua, et al. Damage mechanism of calcium sulphoaluminate cement paste partially exposed to sodium carbonate solution[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(5): 639-643.
- [7]杨晓林, 王根会. 冻融混凝土本构关系与孔结构特征研究[J]. 兰州交通大学学报, 2020, 39(3): 13-18.
- [8]Tanyildizi H. Long-term microstructure and mechanical properties of polymer-phosphazene concrete exposed to freeze-

- thaw [J]. Construction and Building Materials, 2018, 187(10): 1121-1129.
- [9] 乔宏霞, 付勇, 路承功, 等. 基于 Wiener 退化的混凝土加速试验耐久性研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(11): 3496-3502.
- [10] 乔宏霞, 朱彬荣, 路承功, 等. 基于 Wiener 随机过程的混凝土加速寿命试验[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(6): 1023-1027.
- [11] 路承功, 魏智强, 乔宏霞, 等. 盐渍土环境中钢筋混凝土基于 Wiener 随机过程寿命预测[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1): 113-121.
- [12] 李奎, 高志成, 武一, 等. 基于统计回归和非线性 Wiener 过程的交流接触器剩余寿命预测[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4058-4070.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [14] 张茂林, 杜红秀, 陈尧, 等. PP 纤维及冷却方式对 C60 HPC 高温损伤红外热像的影响[J]. 混凝土, 2019(8): 43-46.
- [15] 汪彬, 孟振亚, 张守治. 水胶比对大掺量矿物掺合料混凝土耐久性的影响[J]. 广东化工, 2019, 46(19): 56-58.

Experimental Research on Frost Resistance of Granular Material Framework Under the Principle of Monotonic Material Degradation

Zhang Jialun, Zhang Wenyang, Wang Huidong

(Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Based on the Rong-Wu Expressway project in Xiong'an New Area, the frost resistance test of high-performance fiber concrete was carried out, the effects of different water-glue ratios and mineral admixture dosages on the anti-freezing mass loss and relative dynamic elastic modulus were quantitatively analyzed, and the reliability of the concrete was evaluated by the Wiener function. The results show that: In the frost resistance, with the increase of the number of freeze-thaw cycles, the anti-freeze mass loss rate and the relative dynamic elastic modulus loss rate gradually increase. In the frost resistance, the increase of the water-glue ratio makes the frost resistance mass loss rate and relative dynamic elastic modulus loss gradually increase, while the increase of mineral admixture content will make its frost resistance mass loss rate and relative dynamic elastic modulus loss gradually smaller. With the help of the degradation theory analysis of Wiener's random process, in the loss of frost resistance, the ratio of water glue is inversely proportional to frost resistance, and the amount of mineral admixture is directly proportional to frost resistance. The above research results provide scientific theoretical support and technical guidance for the concrete application of prefabricated beam and plate system of Rong-Wu Expressway.

Key words: concrete; frost resistance; Wiener function; reliability evaluation; water to glue ratio; mineral admixture