

文章编号:1007-9629(2025)02-0176-08

偏高岭土改性 NaOH 预处理橡胶混凝土抗盐冻性能及寿命预测

兰锦¹, 张宏^{2,*}, 姜晓东², 李闯²

(1. 中交路桥华北工程有限公司, 北京 101100;

2. 内蒙古大学交通学院, 内蒙古呼和浩特 010070)

摘要: 利用氯盐与冻融循环耦合的方式模拟盐冻环境, 探究了盐冻过程中偏高岭土(MK)对 NaOH 预处理橡胶混凝土物理力学性能及使用寿命的影响。结果表明: 在盐冻过程中, 改性橡胶混凝土的物理力学性能明显优于橡胶混凝土; MK 增加了水化产物总量, 细化了孔隙结构, 增加了水分在混凝土内的迁移难度, 加之橡胶颗粒自身弹性对冻胀应力的消解作用, 因而降低了改性橡胶混凝土在盐冻环境中的损伤程度; 当 MK 掺量为 15% 时, 改性橡胶混凝土的抗盐冻性能最佳, 其 Weibull 函数预测寿命可达 475 次冻融循环。

关键词: 偏高岭土; NaOH 预处理; 橡胶混凝土; 抗盐冻性能; Weibull 函数; 寿命预测

中图分类号: TU528.37

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2025.02.011

Salt Freezing Resistance and Life Prediction of Metakaolin Modified NaOH Pretreated Rubber Concrete

LAN Jin¹, ZHANG Hong^{2,*}, JIANG Xiaodong², LI Chuang²

(1. China Communications Road and Bridge North China Engineering Co., Ltd., Beijing 101100, China;

2. Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China)

Abstract: The coupling of chloride salt and freeze-thaw cycle was used to simulate the salt freezing environment. The effects of metakaolin(MK) on the physical and mechanical properties of NaOH pretreated rubber concrete during salt freezing were studied, as well as its service life. The results indicate that modified rubber concrete exhibits significantly better physical and mechanical properties than rubber concrete during salt freezing. MK significantly increases the total amount of hydration products, refines the pore structure, and reduces damage to modified rubber concrete in salt freezing environments. The dissolution effect of rubber particle elasticity on frost heave stress is a key factor in achieving this improved performance. The optimal MK content for achieving the best salt freezing resistance is 15%, which is predicted to result in a Weibull function life of 475 freeze-thaw cycles.

Key words: metakaolin; NaOH pretreatment; rubber concrete; salt freezing resistance; Weibull function; life prediction

作为大宗固体废物, 废旧轮胎的资源化利用受到了广泛关注。采用废旧轮胎粉碎后的橡胶粉制备

橡胶混凝土(RC), 为废旧轮胎的资源化利用提供了新的思路^[1-4]。然而, 橡胶属于疏水有机材料, 与水泥

收稿日期: 2024-02-27; 修订日期: 2024-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51968053, 52268071); 内蒙古自治区杰出青年基金资助项目(2023JQ03); 内蒙古大学高层次人才科研启动基金项目(10000-22311201/008)

第一作者: 兰锦(1977—), 男, 北京人, 中交路桥华北工程有限公司高级工程师, 硕士. E-mail: 1203908214@qq.com

通讯作者: 张宏(1978—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 内蒙古大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: zhanghong3537@126.com

基材料的黏结关系薄弱,造成橡胶混凝土的力学性能较差.为提高橡胶混凝土的力学性能,目前主要有2种方法:一是添加掺合料(如硅灰、稻壳灰)^[5-6],其目的在于提高水化产物的生成量,增强水化产物间的黏结强度,优化孔隙结构;二是利用化学试剂(如NaOH溶液、硅烷偶联剂)对橡胶表面进行改性^[7-8],以降低橡胶的疏水性.课题组前期研究表明,通过添加偏高岭土(MK)配合NaOH预处理橡胶颗粒的方式,可以显著提升橡胶混凝土的力学性能^[9].

为保障冬季道路的交通安,多采用播撒融雪剂的方式来消除积雪.然而,交通基础设施中的混凝土结构会受到融雪剂与冻融的耦合破坏作用^[10-12].在前期研究基础之上,考虑到MK改性NaOH预处理橡胶混凝土在一般环境中展现出的良好性能,为拓展、探索该改性橡胶混凝土的应用场景,本文对该改性橡胶混凝土的抗盐冻性能与增强机理展开了系统的试验研究,并利用Weibull分布预测了盐冻环境下该改性橡胶混凝土的使用寿命,为其在寒冷地区实际工程中的应用提供参考.

1 试验

1.1 原材料

水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥;粗骨料为5~20 mm连续级配的碎石;细骨料为中砂,细度模数为2.8;橡胶颗粒通过废弃橡胶轮胎处理得到,由

都江堰市华益橡胶有限公司生产,粒径为600 μm(30目),堆积密度为314 kg/m³;NaOH为分析纯,配置5%(质量分数,文中涉及的减水率、水灰比除特别说明外均为质量分数或质量比)NaOH溶液对橡胶颗粒进行预处理,处理时间为30 min,以降低橡胶颗粒的疏水性^[13];NaCl为分析纯,配置3.5%NaCl溶液作为冻融介质^[14];减水剂为聚羧酸粉体减水剂,减水率为18%~20%;MK为内蒙古超牌偏高岭土有限公司生产,由高岭石原矿经煅烧后研磨而成,活性指数为120,比表面积为20 m²/g,粒径约为1 μm(见图1).

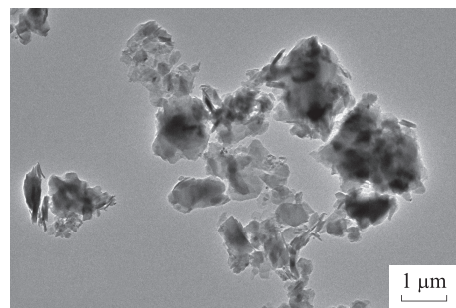


图1 MK的微观形貌

Fig. 1 Micromorphology of MK

1.2 配合比及试验方法

MK以等质量替代水泥的方法掺入,MK掺量分别为0%、5%、10%、15%、20%和25%,水灰比为0.4.混凝土的配合比如表1所示.

表1 混凝土的配合比

Table 1 Mix proportions of concretes

Specimen	Cement	Water	Coarse aggregate	Fine aggregate	Rubber particle	MK	Water reducer
RC	425.00	170.00	1 110.00	675.00	17.96	0	4.25
MRC5	403.75	170.00	1 110.00	675.00	17.96	21.25	4.25
MRC10	382.50	170.00	1 110.00	675.00	17.96	42.50	4.25
MRC15	361.25	170.00	1 110.00	675.00	17.96	63.75	4.25
MRC20	340.00	170.00	1 110.00	675.00	17.96	85.00	4.25
MRC25	318.75	170.00	1 110.00	675.00	17.96	106.25	4.25

Unit: kg/m³

参照GB/T50082—2019《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》进行快速冻融试验,以3.5%的NaCl溶液为冻融介质,每25次冻融循环进行1次测试并更换盐溶液,测试内容包括质量、动弹性模量和抗压强度.

孔结构测试采用AutoPore IV 9500型压汞仪(MIP),热重分析采用德国耐驰STA 449C型同步热分析仪(TG-DTG),微观形貌观察采用蔡司SIGMA300型扫描电镜(SEM).

2 结果与分析

2.1 表观形态

图2为橡胶混凝土冻融损伤的表观形态.由图2可见:

(1)橡胶混凝土试件在冻融循环50次时即出现了表面砂浆剥落的现象,并且随着冻融循环次数(T)的增加,其表面砂浆剥落的状况加剧;冻融循环100次后,试件表面出现了粗骨料大面积外露的情况.

(2)改性橡胶混凝土试件在不同冻融循环次数下的表面状况总体上均明显优于橡胶混凝土试件.冻融循环50次时,试件表面只发生轻微的劣化迹象,无明显损伤;冻融循环100次时,试件表面仅出现少量骨料裸露的情况;冻融循环150次时,部分试件的表面状态仍优于橡胶混凝土试件冻融循环100次时的表面状态.在改性橡胶混凝土中,试件MRC15的表面破坏情况最轻,说明当MK掺量为15%时,改性橡胶混凝土的表面抗盐冻剥蚀性能最佳.

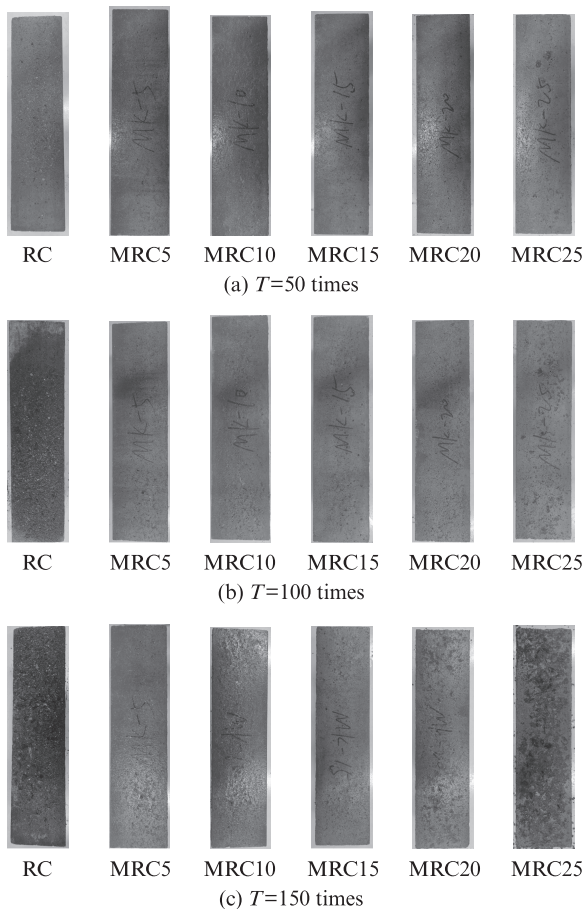


图2 橡胶混凝土冻融损伤的表观形态

Fig. 2 Apparent morphology of freeze-thaw damage of rubber concrete

2.2 质量损失率

图3为橡胶混凝土的质量损失率.由图3可见:

(1)总体而言,在试验前期(冻融循环50次前),部分试件的质量损失率出现负值.此时,试件表面剥落的骨料较少,但冻胀裂缝导致了混凝土的吸水率增加,混凝土的质量有小幅增加,使质量损失率出现了负值.

(2)超过50次冻融循环后,各试件的质量损失率开始出现上升的趋势:橡胶混凝土试件的质量损失率积累较快,经历150次冻融循环后的质量损失率超

过1.5%.改性橡胶混凝土试件的质量损失率累积较慢,经150次冻融循环后,所有试件的质量损失率均小于1.5%.其中,试件MRC15的质量损失率最低,说明当MK掺量为15%时,改性橡胶混凝土的抗剥蚀效果最优.

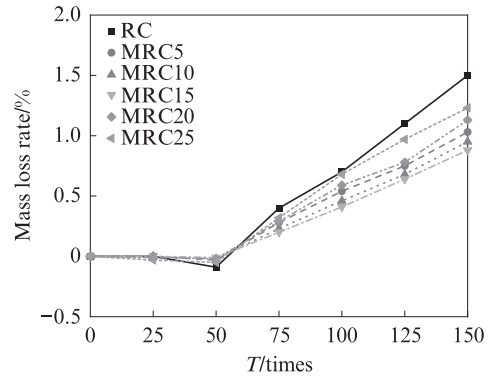


图3 橡胶混凝土的质量损失率

Fig. 3 Mass loss rate of rubber concrete

2.3 抗压强度损失率

图4为橡胶混凝土的抗压强度损失率.由图4可见:橡胶混凝土在冻融循环50次后的抗压强度已大幅降低;随着冻融循环次数的增加,橡胶混凝土的抗压强度损失率持续增加,在冻融循环150次后,其抗压强度降低了近30%;改性橡胶混凝土在经历不同次数的冻融循环后,其抗压强度均高于橡胶混凝土;试件MRC10和MRC15在经历150次冻融循环后的抗压强度损失率仅为20%左右,表现出良好的抗盐冻性能.

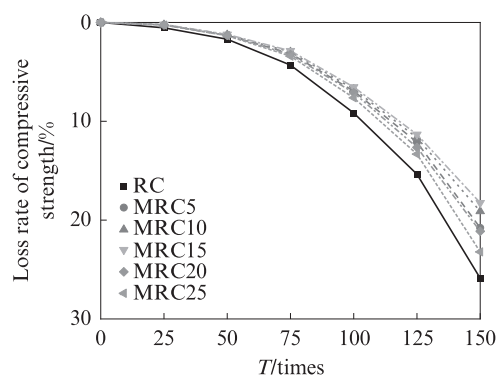


图4 橡胶混凝土的抗压强度损失率

Fig. 4 Loss rate of compressive strength of rubber concrete

2.4 相对动弹性模量

图5为橡胶混凝土的相对动弹性模量.由图5可见:在冻融循环初期(冻融循环25次前),各试件的相对动弹性模量差异较小;冻融循环50次后,不同试件的相对动弹性模量开始出现明显变化:橡胶混凝土的相对动弹性模量快速降低,改性橡胶混凝土的相

对动弹性模量下降相对较慢;冻融循环 150 次后,改性橡胶混凝土的相对动弹性模量均保持在 85% 以上,其中试件 MRC10 和 MRC15 的相对动弹性模量维持在 90% 以上,抗盐冻性能良好。

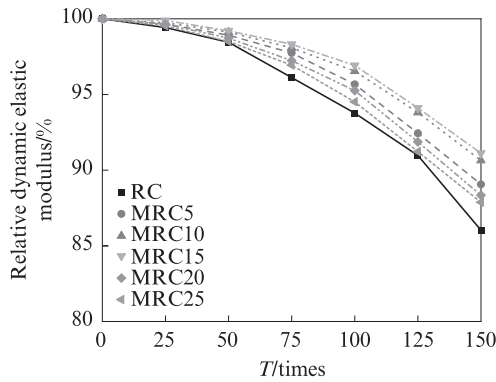


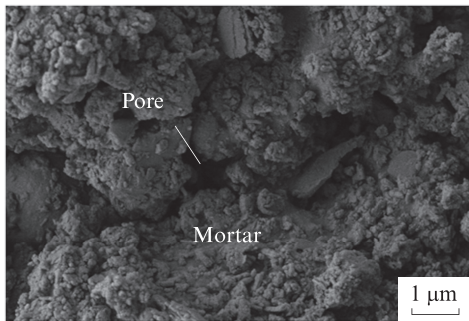
图 5 橡胶混凝土的相对动弹性模量

Fig. 5 Relative dynamic elastic modulus of rubber concrete

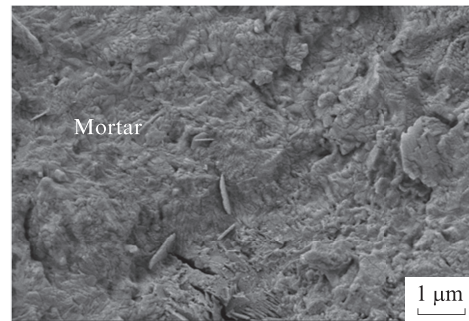
2.5 改性橡胶混凝土微观结构特征

图 6 为试件 RC 和 MRC15 在冻融循环前的微观形貌。由图 6 可见:在橡胶混凝土试件 RC 内部,胶凝材料的孔隙较多,同时出现了因骨料未被胶凝材料紧密包裹而裸露在外的情况;在改性橡胶混凝土试件 MRC15 内部,胶凝材料的孔隙细小且稀疏,胶凝材料内部的密实性良好,骨料被胶凝材料紧密包裹,未出现骨料裸露的现象。

图 7 为试件 RC 和 MRC15 在冻融循环 150 次后的微观形貌。由图 7 可见:经历 150 次冻融循环后,橡胶混凝土试件 RC 的内部出现了大量孔隙,原本相对致密的微观结构遭到严重破坏;改性橡胶混凝土试件 MRC15 的内部结构同样出现了明显的疏松迹象,但相对于试件 RC 而言,其微观结构更为致密,孔隙也相对较少、较细。



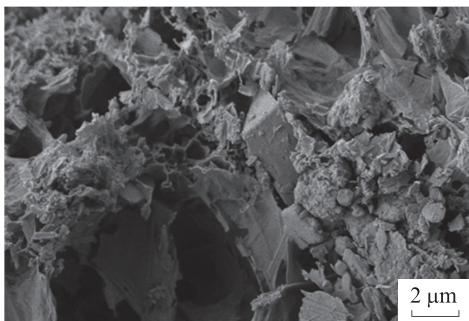
(a) RC



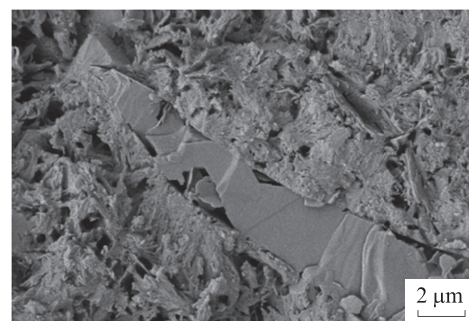
(b) MRC15

图 6 试件 RC 和 MRC15 在冻融循环前的微观形貌

Fig. 6 Microstructure of specimen RC and MRC15 before freeze-thaw cycles



(a) RC



(b) MRC15

图 7 试件 RC 和 MRC15 在冻融循环 150 次后的微观形貌

Fig. 7 Microstructure of specimen RC and MRC15 after freeze-thaw cycles (T=150 times)

抗压强度是评价混凝土试件耐久性的重要指标,当其内部出现微裂纹与较多孔隙时,材料之间的黏结作用会下降,势必会导致混凝土抗压强度的下降。同时动弹性模量指标可以较好地反映混凝土内部的变化情况。当混凝土内部的孔隙及微裂缝增多时,会降低动弹性模量在混凝土内部的谐振频率,进而根据强度理论推算出混凝土在盐冻作用下的劣化情

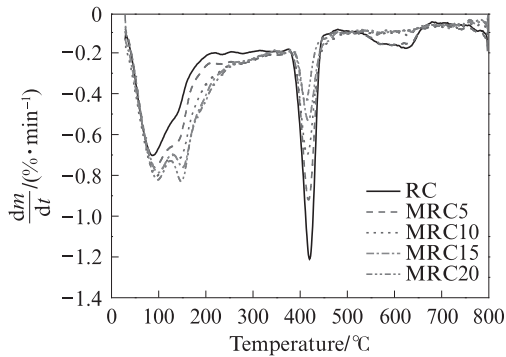
况。改性橡胶混凝土抗压强度损失率以及相对动弹性模量损失率的变化小于橡胶混凝土,表明微观试验结果可以在一定程度上反映盐冻环境下 MK 对橡胶混凝土抗盐冻性能的改善作用。

2.6 偏高岭土对橡胶混凝土抗盐冻性能的改善机理

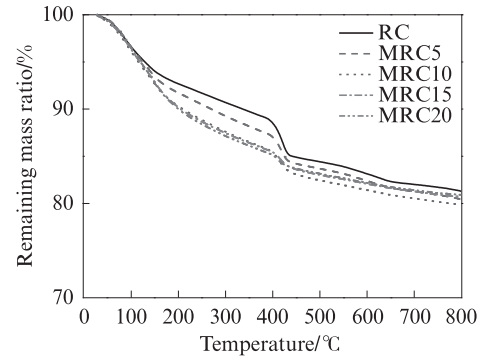
图 8 为试件养护 28 d 时的 TG-DTG 曲线。由图 8 可见,各试件的 DTG 曲线形态相似,主要存在水

化硅酸钙(C-S-H)凝胶和钙矾石(Aft)等水化产物的分解(30~300 °C)、Ca(OH)₂的分解(370~450 °C)

以及CaCO₃的分解(530~660 °C)^[15]等3个失重过程。



(a) DTG



(b) TG

图8 试件养护28 d时的TG-DTG曲线

Fig. 8 TG-DTG curves of specimens at 28 d

表2为混凝土中水泥石主要水化产物的化学结合水含量.由表2可见:随着MK掺量的增加,水泥石中C-S-H凝胶和AFt等水化产物中的化学结合水含量呈增加趋势,Ca(OH)₂中的化学结合水含量呈降低趋势;掺加MK后,水泥石中水泥的含量降低,但由于MK具有较强的火山灰活性,使得水泥石中的Ca(OH)₂被大量消耗,经二次水化反应生成了较多的C-S-H凝胶以及AFt等水化产物,增强了胶凝材料与骨料之间的连接关系;同时,C-S-H凝胶和AFt相互叠加,形成了致密的空间网架结构,降低了改性橡胶混凝土内部的孔隙率,进一步提升了改性橡胶混凝土内部的密实程度.

表3为改性橡胶混凝土内部水泥石的孔隙结构参数.由表3可见:改性橡胶混凝土内部水泥石的平均孔径、中位孔径和孔隙率减小,比表面积增加;相较于橡胶混凝土试件RC,改性橡胶混凝土试件MRC15的平均孔径和孔隙率分别下降了44.3%和20.5%.这说明改性橡胶混凝土的密实程度更高,孔隙结构得到了细化.

表3 改性橡胶混凝土内部水泥石的孔隙结构参数

Table 3 Pore structure parameters of cement stone in modified rubber concrete

Specimen	Average pore diameter/nm	Median pore diameter/nm	Porosity(by volume)/%	Specific surface area/(m ² ·g ⁻¹)
RC	9.7	13.2	26.4	20.9
MRC5	6.3	6.5	24.9	29.1
MRC10	6.1	5.6	24.7	30.8
MRC15	5.4	5.3	21.0	31.1

3 基于Weibull分布的可靠性分析

3.1 Weibull分布基本模型

Weibull分布是混凝土材料可靠性及寿命预测

表2 混凝土中水泥石主要水化产物的化学结合水含量

Table 2 Chemically bound water content of hydration products of cement stone

Specimen	C-S-H gel and AFt	Ca(OH) ₂	Total loss of water	Unit: %
RC	9.3	4.5	18.7	
MRC5	10.7	3.6	19.3	
MRC10	12.4	3.1	19.6	
MRC15	12.6	2.4	20.1	
MRC20	12.5	2.3	19.1	

在盐冻过程中,混凝土孔隙内部会出现孔隙溶液迁移,以及不同程度的盐析出现象,这会造成孔隙间出现渗透压力差,进而对混凝土的内部结构造成破坏.在混凝土中添加橡胶和MK后会起到两方面的作用:首先,橡胶通过其良好的弹性,增加混凝土内部孔壁的弹性,能够吸收部分渗透压力;其次,MK的掺入能够细化混凝土的孔隙结构,使得混凝土内部不连通的孔隙增多,提高了孔隙溶液在混凝土内部的迁移难度.因此,改性橡胶混凝土的抗盐冻性能得到了明显改善.

中常用的概率分布函数.本文采用二参数Weibull分布^[16-17],假设改性橡胶混凝土耐久性寿命(T)服从该分布,同时估算分布函数中的形状参数和尺度参数,建立改性橡胶混凝土可靠度函数.

改性橡胶混凝土寿命分布函数为:

$$F(T) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{T}{\eta}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中: $F(T)$ 为 T 次冻融循环耦合作用下改性橡胶混凝土的平均损伤度, $T \geq 0$; η 为尺度参数, $\eta > 0$; m 为形状参数, $m > 0$.

概率密度函数 $f(T)$ 为:

$$f(T) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{T}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{T}{\eta}\right)^m\right] \quad (2)$$

可靠度函数 $R(T)$ 为:

$$R(T) = 1 - F(T) = \exp\left[-\left(\frac{T}{\eta}\right)^m\right] \quad (3)$$

改性橡胶混凝土的可靠性随着盐冻次数的增加而降低,直到可靠度为0时,构件失效,因此 $0 < R(T) < 1$.

3.2 假设检验

考虑到相对动弹性模量可以较好地反映混凝土的损伤程度,因此以相对动弹性模量为模型参数,并检验该评价参数随盐冻次数的变化是否服从 Weibull 分布函数.采用 Minitab 软件进行概率分布检验,结果表明评价参数的数据均在 95% 置信区间内,概率 $P > 0.05$,假设正确,相对动弹性模量随盐冻循环次数的变化遵循 Weibull 分布函数,可以用于建立改性橡胶混凝土的耐久性劣化模型.

3.3 参数估计

改性橡胶混凝土的损伤度(D)如式(4)所示.

$$D = \frac{E_0 - E_T}{0.4E_0} \quad (4)$$

式中: D 的正常范围为 $[0,1]$,在此范围内改性橡胶混凝土未达到失效状态,当 $D \geq 1$ 时混凝土试件达到失效状态,当 $D \leq 0$ 时混凝土处于强化阶段; E_0 为初始弹性模量,GPa; E_T 为盐冻循环 T 次后的动弹性模量,GPa.

常用的参数估计方法有最小二乘法、矩估计法和最大似然法等.已有研究表明,对于混凝土材料,最小二乘法较为适用^[18].因此,本文 Weibull 分布参数估计采用最小二乘法对可靠度函数取对数,由式(3)得:

$$\ln[-\ln R(T)] = m \ln T - m \ln \eta \quad (5)$$

令 $y = \ln[-\ln R(T)]$, $x = \ln T$ 最终得到:

$$y = ax + b \quad (6)$$

式中: $m = a$; $\eta = \exp\left(-\frac{b}{m}\right)$.

本次以试件 MRC15 的相对动弹性模量试验数

据为例,将数据带入上述式中进行计算,可以得到 Weibull 分布特征参数的计算结果,进而求得 $\ln[-\ln R(T)]$ 和 $\ln T$. 由于之前假设改性橡胶混凝土的损伤度服从 Weibull 分布函数,因此损伤度 $D = 1 - R(T)$. 选用最小二乘法对式(6)中的 a 、 b 进行计算. 通过计算得出的拟合式为 $y = 2.1109x - 12.1096$, 相关系数 $R^2 = 0.9910$, 拟合结果较好(见图9),表明改性橡胶混凝土的损伤程度符合 Weibull 分布. 由此确定出 $a = 2.1109$, $b = -12.1096$, 将 a 、 b 分别代入求出 $m = 2.1109$, $\eta = 310.04$, 各组试验数据的相关参数如表4所示.

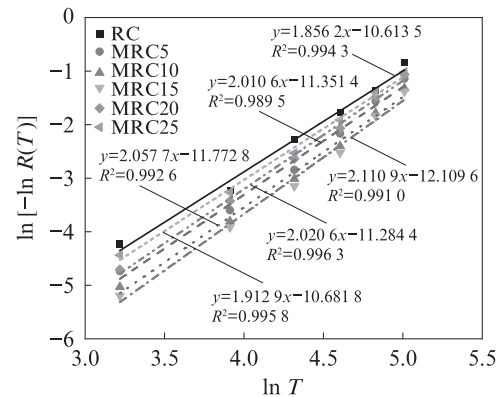


图9 参数拟合图

Fig. 9 Parameter fitting diagram

表4 Weibull分布特征参数

Table 4 Weibull distribution characteristic parameters

Specimen	a	b	m	η
RC	1.856 2	-10.613 5	1.856 2	252.32
MRC5	2.010 6	-11.351 4	2.010 6	283.09
MRC10	2.057 7	-11.772 8	2.057 7	305.31
MRC15	2.110 9	-12.109 6	2.110 9	310.04
MRC20	2.020 6	-11.284 4	2.020 6	266.31
MRC25	1.912 9	-10.681 8	1.912 9	266.16

3.4 可靠性分析

从表4可以获得改性橡胶混凝土的形状参数 m 和尺度参数 η . 将各参数代入式(2)、(3)中,可求出概率密度函数 $f(T)$ 和可靠度函数 $R(T)$. 以试件 MRC15 为例,计算式如下:

$$f(T) = \frac{2.1109}{310.04} \left(\frac{T}{310.04}\right)^{1.1109} \exp\left[-\left(\frac{T}{310.04}\right)^{1.1109}\right] \quad (7)$$

$$R(T) = \exp\left[-\left(\frac{T}{310.04}\right)^{2.1109}\right] \quad (8)$$

计算得到概率密度函数 $f(T)$ 曲线如图10所示,以及可靠度函数 $R(T)$ 曲线如图11所示. 由图11可见:在

盐冻耦合作用试验条件下,橡胶混凝土在400次冻融循环后的可靠度接近为0;改性橡胶混凝土的预测寿命明显高于橡胶混凝土,其中试件MRC15的预测寿命可以达到475次,相较于橡胶混凝土试件RC提升了18.8%.

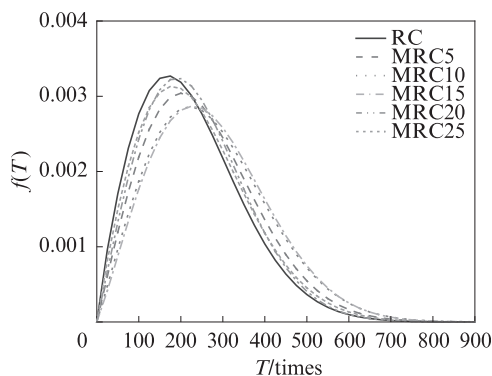


图10 改性橡胶混凝土损伤的概率密度函数

Fig. 10 Probability density function of modified rubber concrete damage

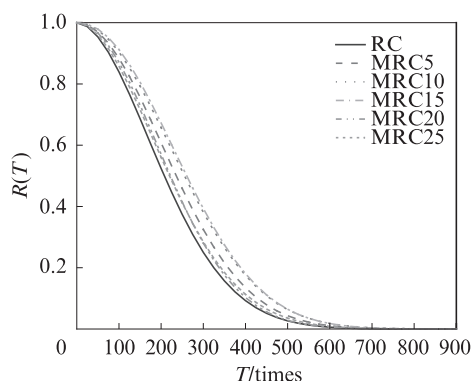


图11 改性橡胶混凝土损伤的可靠度曲线

Fig. 11 Reliability curve of modified rubber concrete damage

4 结论

(1)在橡胶混凝土中加入适量的偏高岭土(MK)可以降低其孔隙结构.当MK掺量为15%时,改性橡胶混凝土的孔隙结构最为致密.MK能够提高水泥石中水化硅酸钙凝胶、钙矾石等水化产物含量,增强胶凝材料与骨料间的连接关系,并提升混凝土的密实程度.

(2)掺入MK可以改善盐冻环境下橡胶混凝土的表面损伤情况,有效提升橡胶混凝土的抗盐冻性能.当MK掺量为15%时,改性橡胶混凝土的抗盐冻性能最佳.

(3)在盐冻环境下,改性橡胶混凝土的相对动弹性模量服从Weibull分布.MK掺量为15%的改性橡胶混凝土的Weibull函数预测寿命约475次冻融循环,相较于橡胶混凝土提升约18.8%,展现出良好的

抗盐冻性能.

参考文献:

- [1] XUE J, SHINOZUKA M. Rubberized concret: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability [J]. Construction and Building Materials, 2013, 42:196-204.
- [2] RIDA A A, SALAH A U, MOHAMMED M, et al. Effect of different treatments of crumb rubber on the durability characteristics of rubberized concrete [J]. Construction and Building Materials, 2022, 318:126030.
- [3] 胡艳丽, 高培伟, 李富荣, 等. 不同取代率的橡胶混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1):85-92. HU Yanli, GAO Peiwei, LI Furong, et al. Experimental study on mechanical properties of rubber concrete with different substitution rates[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 85-92. (in Chinese).
- [4] 王娟, 王文超, 许耀群, 等. 纳米SiO₂对橡胶混凝土断裂行为的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(7):731-738. WANG Juan, WANG Wenchao, XU Yaoqun, et al. The effect of nano-SiO₂ on the fracture behavior of rubber concrete [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(7):731-738. (in Chinese)
- [5] GÜNEYISI E, GESOĞLU M, ÖZTURAN T. Properties of rubberized concretes containing silica fume [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(12):2309-2317.
- [6] 王恒, 徐义华, 姚韦靖, 等. 稻壳灰橡胶混凝土抗冻融性能及微观结构[J]. 复合材料学报, 2023, 40(5):2951-2959. WANG Heng, XU Yihua, YAO Weijing, et al. Freeze-thaw resistance and microstructure of rice husk ash rubber concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(5):2951-2959. (in Chinese)
- [7] 杨长辉, 田义, 王磊, 等. NaOH预处理对橡胶混凝土性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(2):44-50. YANG Changhui, TIAN Yi, WANG Lei, et al. Effect of NaOH pretreatment on the properties of rubber concrete [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2016, 38(2):44-50. (in Chinese)
- [8] 刘誉贵, 马育, 刘攀. 氨化与磺化改性橡胶混凝土机理及强度研究[J]. 材料导报, 2018, 32(18):3142-3145, 3153. LIU Yugui, MA Yu, LIU Pan. Study on the mechanism and strength of ammoniated and sulfonated modified rubber concrete [J]. Material Review, 2018, 32(18):3142-3145, 3153. (in Chinese)
- [9] 姜晓东, 张宏, 李闯, 等. 偏高岭土对NaOH预处理橡胶混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(7):589-595. JIANG Xiaodong, ZHANG Hong, LI Chuang, et al. The effect of metakaolin on the mechanical properties of NaOH pretreated rubber concrete [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(7): 589-595. (in Chinese)
- [10] 王阵地, 姚燕, 王玲. 冻融循环-氯盐侵蚀-荷载耦合作用下混凝土中钢筋的锈蚀行为[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(6):1022-1027. WANG Zhendi, YAO Yan, WANG Ling. Corrosion behavior of steel bars in concrete under freeze-thaw cycles-chloride

- erosion-load coupling[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(6):1022-1027. (in Chinese)
- [11] LEI B, LI W G, TANG Z, et al. Durability of recycled aggregate concrete under coupling mechanical loading and freeze-thaw cycle in salt-solution[J]. Construction and Building Materials, 2018, 163:840-849.
- [12] 王阵地, 姚燕, 王玲. 冻融循环与氯盐侵蚀作用下混凝土变形和损伤分析[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8):1133-1138.
WANG Zhendi, YAO Yan, WANG Ling. Deformation and damage analysis of concrete under freeze-thaw cycles and chloride attack[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(8): 1133-1138. (in Chinese)
- [13] 李振霞, 陈渊召, 郭滕滕, 等. 改性橡胶碾压混凝土路用性能及作用机理[J]. 中国公路学报, 2023, 36(5):38-48.
LI Zhenxia, CHEN Yuanzhao, GUO Tengting, et al. Pavement performance and action mechanism of modified rubber roller compacted concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(5):38-48. (in Chinese)
- [14] 郭凯, 佟舟, 张树峰, 等. 冻融与氯盐侵蚀耦合作用下 GO-RAC 耐久性能研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(11):1183-1191.
GUO Kai, TONG Zhou, ZHANG Shufeng, et al. Study on the durability of GO-RAC under the coupling effect of freeze-thaw and chloride erosion[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11): 1183-1191. (in Chinese)
- [15] CYR M, TRINH M, HUSSON B, et al. Effect of cement type on metakaolin efficiency[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 64:63-72.
- [16] 路承功, 魏智强, 乔宏霞, 等. 基于 Weibull 分布的钢筋混凝土腐蚀环境耐久性寿命预测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(6):1534-1544.
LU Chenggong, WEI Zhiqiang, QIAO Hongxia, et al. Durability life prediction of reinforced concrete in corrosive environment based on Weibull distribution[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(6):1534-1544. (in Chinese)
- [17] HUANG J, QIU S C, RODRIGUE D. Parameters estimation and fatigue life prediction of sisal fibre reinforced foam concrete [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 381-396.
- [18] 王鹏辉, 乔宏霞, 冯琼, 等. 氯氧镁水泥混凝土中涂层钢筋的耐久性退化研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3):563-571.
WANG Penghui, QIAO Hongxia, FENG Qiong, et al. Study on durability degradation of coated reinforcement in magnesium chloride-cement concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3):563-571. (in Chinese)