

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201800787

带初始冻融损伤的混凝土材料受盐冻作用下性能劣化分析

徐存东^{1,2}, 程 昱¹, 王荣荣^{1*}, 连海东¹, 张宏洋^{1,3}, 白卫峰^{1,2}

(1.华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046; 2.河南省水工结构安全工程技术研究中心, 河南 郑州 450046;
3.水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心, 河南 郑州 450046)

摘 要:为探明早期受冻后引起的带有初始损伤的混凝土材料在冻融循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下力学性能的损伤演变规律, 在制备混凝土试件养护期内, 分别在7 d与14 d时实施冻融1次, 使其产生不同程度的初始损伤, 进而研究早期冻融造成的不同程度初始损伤对试件宏观性能与内部结构的影响作用。基于损伤力学理论, 分别将混凝土试件的动弹性模量与抗压强度定义为损伤变量, 对变量的损伤过程进行回归拟合分析, 构建了由早期冻融造成的不同初始损伤试件在腐蚀受冻环境中的损伤演变方程。结果表明: 两种带有不同初始损伤度的混凝土试件其各项力学性能的衰变过程受早期冻融影响均出现了“超前效应”, 且该效应的出现幅度与初始损伤度有着极大联系; 同时, 通过对比分析混凝土超声脉冲传播速度与内部缺陷区的变化过程得知, 早期冻融加速了空洞与裂缝的扩展速度, 对混凝土综合性能的初始值与后期抗盐冻能力存在不利影响; 动弹性模量与抗压强度损伤演变方程可作为相似损伤程度下混凝土力学性能衰减的通用公式, 为相似环境下结构的服役状态评估和寿命预测提供理论依据, 同时可以基于动弹性模量与抗压强度的损伤关系式对二者进行相互推导, 降低了由于仪器不足等原因导致数据获取不足的局限性。

关键词:混凝土; 冻融循环; 硫酸盐侵蚀; 早期冻融; 初始损伤; 损伤演变规律

中图分类号:TU528.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)01-0017-10

Analysis of Performance Deterioration of Concrete Material with Initial Freeze-thaw Damage Under Salt-freezing Condition

XU Cundong^{1,2}, CHENG Yu¹, WANG Rongrong^{1*}, LIAN Haidong¹, ZHANG Hongyang^{1,3}, BAI Weifeng^{1,2}

(1.School of Water Conservancy, North China Univ. of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2.Henan Provincial Hydraulic Structure Safety Eng. Research Center, Zhengzhou 450046, China;

3.Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficiency and Protection Eng., Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to find out the damage evolution rule of the concrete with initial damage caused by early freezing under the coupling of freeze-thaw cycle and sulfate erosion, initial damage to concrete specimens by freezing and thawing them at the 7th and 14th day during the preparation of concrete specimens was carried. Based on this, different initial damage degree on macro performance and internal structure was researched. Then according to the principle of damage mechanics, the dynamic modulus of elasticity and compressive strength were defined as damage variables, by regression fitting analysis of damage process of variable, and the damage evolution equation of different initial damage specimen caused by early freeze-thaw was established in corrosion and freezing environment. The results indicated that two kinds of concrete specimens with different initial damage are affected by early freeze-thaw in the decay process of their mechanical properties and their form are “lead effect”, which is closely related to the degree of initial damage. At the same time, the comparison and analysis of the change process of ultrasonic pulse propagation velocity and internal defect zone of concrete inferred that early freeze-thaw accelerates the propagation speed of cavity and crack, and the initial value of macroscopic mechanical properties of concrete and the ability of resisting salt and freezing in later stage are affected. The dynamic

收稿日期:2018-07-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51579102; 31360204); 河南省科技厅科技创新人才支持计划资助项目(174200510020); 河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(19IRTSTHN030); 宁夏回族自治区水利科技专项资助(TYZB-ZFCG-2017-31)

作者简介:徐存东(1972—),男,教授,博士生导师,博士。研究方向:水工结构优化设计和水士环境。E-mail:xcundong@126.com

* 通信联系人 E-mail: wrrong369@163.com

网络出版时间:2018-12-24 16:48:16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.tb.20181219.1553.011.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

modulus of elasticity and the damage evolution equation of compressive strength can be used as a general formula for the attenuation of mechanical properties of concrete with similar damage degree, which can provide a theoretical basis for evaluating the service status and predicting the life of structures in similar environments. At the same time, the damage relationship between dynamic modulus of elasticity and compressive strength can be deduced from each other, which can reduce the limitation of data acquisition due to the shortage of instruments.

Key words: concrete; freeze-thaw cycle; sulfate erosion; early freeze-thaw; initial damage; damage evolutionary law

在严寒地区服役的水工建筑物受其特殊工作环境的影响,极易遭受冻融循环的破坏^[1],尤其中国西北地区的气候特征为“高蒸发低降雨”,导致当地土壤与水中可溶性盐离子(硫酸盐为主)含量较高,结构的细部构件逐渐被盐离子渗入,因此位于西北地区的水工结构耐久性衰减的主要原因为盐侵-冻融双重破坏^[2-3]。在实际工程中,结构质量与施工过程中的操作严谨程度有着直接关联,但考虑到工期、工作温度等不可变因素,混凝土养护阶段无法完全按照规范标准进行处理,这对单个构件的初始力学性能发展产生了一定影响,进而对整体结构而言结构本身在尚未进行服役时即遭受了一定的由外界低温导致的初始损伤^[4]。因此,对于因冬季养护温度较低而造成具有初始损伤的混凝土,通过相关试验模拟试件在盐侵-冻融破坏条件下力学性能的损伤演变过程,可以探明混凝土材料的力学性能衰变规律,从而提高后续混凝土结构服役状态评估结果的准确性,并可为进一步精确预测混凝土结构的剩余服役寿命提供了数据基础,也有利于掌握修补构件的合理时间,避免修补不及时或不到位等情形的出现。

针对盐离子侵蚀混凝土构件的过程、机理、性能衰减规律以及本构关系等问题,国内外专家学者做出了多方面的研究, Piasta^[5]通过抗压强度和吸水性的试验研究了碳化-盐侵双重作用下混凝土结构性能的衰减规律,并借助SEM、EDXA和XRD等微观检测手段,分析了碳化-盐侵作用下混凝土内部侵蚀产物的质变过程; Hoppe等^[6]通过对比掺加不同矿物掺合料的混凝土在硫酸盐侵蚀状态下,试件的微观结构与孔隙结构的变化规律,确定了能较好地提高混凝土抗盐侵能力的矿物掺合料; 乔宏霞等^[7]采用相对质量评价参数与相对动弹性模量评价参数反映硫酸盐侵蚀作用下混凝土的损伤过程,并借助电镜等仪器对试件的微观损伤状态进行观察,研究了盐侵情形下混凝土损伤机理,明确了盐分的化学腐蚀和物理结晶作用对混凝土性能的影响方式; Siad等^[8]通过测取浸泡在硫酸盐溶液中混凝土的质量和超声波脉冲速度的变化规律,分析混凝土微观结构的降解过程,证实了干燥剂对硫酸盐侵蚀的抵消作用,并得出了掺加干燥剂的混凝土试件的降解机理。如今,多种外界因素的耦合作用下,混凝土物理性能与力学特

征的损伤演化过程的相关研究逐渐完善。

但随着对表征混凝土各项耐久性的持续研究,探讨更加符合工程实际的带有初始损伤混凝土的性能损伤规律也逐渐受到学者们的关注。杨永敢等^[9]研究了由荷载压力引起的具有初始损伤的试件在干湿-盐侵中质量和相对动弹性模量的变化量,并借助微观检测手段(SEM、MIP、EDS)分析了硫酸盐侵蚀作用下带初始损伤混凝土的孔结构与腐蚀产物组分的变化,提出了基于初始损伤程度影响和应变速率效应双重影响下的混凝土抗压强度预测模型; Colombi等^[10]研究了由疲劳荷载造成的不同初始损伤度对混凝土试件后续疲劳寿命的影响,并基于此探讨了碳纤维增强聚合物复合材料对初始损伤破坏作用的抵消效果; 刘娟红等^[11]研究了盐侵-干湿作用下由荷载引起的带不同程度初始损伤试件的质量、强度、应力应变曲线与声发射活动的变化,构建了基于声发射特性的含初始损伤混凝土的腐蚀受荷损伤模型,并通过微观手段揭示了受硫酸盐腐蚀作用初始损伤混凝土微结构的损伤机制; 庞森等^[12]通过对RC梁试件施加初始荷载造成不同程度的损伤,对梁试件进行单调加载试验与海水干湿循环试验,明确了不同初始损伤荷载下试件的屈服荷载、极限荷载和氯离子含量的变化规律与数学模型。但是,这些研究多是针对由外加荷载导致初始损伤混凝土,对因养护条件不当引起的初始损伤混凝土的性能衰变规律研究尚且不足。尤其针对严寒地区水工建筑物在冬季施工时,受初期养护过程中保温不当造成的结构初始损伤,后期服役同时受冻融侵蚀复合作用的状况,带初始损伤的结构在盐侵-冻融耦合作用下各项性能的损伤演变过程的研究尚不多见,无法对实际工程中混凝土结构的性能衰退过程进行准确地推导与剩余寿命的预测。基于此,作者通过对混凝土试件进行早期冻融以造成初始损伤,研究表征混凝土耐久性的衰减规律,以便为实际工程进行准确、合理评估。

作者依据实际工程中最常用的两种养护时间(7 d与14 d)对混凝土试件的养护状态进行模拟,将试件于7 d或14 d冷冻1次后剩余时间再标准养护;然后,置于硫酸盐侵蚀和冻融循环双重耦合作用下进行试验。通过与标准养护下的无损伤混凝土试件进行对比,明确不同养护条件对试件造成的不同初始损伤

程度与混凝土各项力学性能的对应关系,通过拟合手段获取各自损伤函数,为后续相应养护条件下混凝土结构的寿命预测提供一定依据。

1 试验设计

1.1 原材料选取与配合比设计

试验配合比以某实际工程中各材料类型与比例为依据进行设计,其中,所用水泥为天瑞P.O 42.5标号,其具体物理性能见表1;细骨料采用河南驻马店汝河河砂,其具体性能指标参数见表2;粗骨料采用5~20 mm且级配连续、质地坚硬、无针片状颗粒的石灰岩碎石。同时,为适当降低混凝土的水化热与内部气泡直径,分别选取河南郑州火电厂粉煤灰为掺合料、上海枫杨公司由野生皂类植物提取制成的SJ-3粉体型引气剂为外加剂,基于以上材料构成的混凝土配合比组成见表3。

表1 P.O 42.5水泥强度参数指标

龄期	3 d抗折强度/MPa	28 d抗折强度/MPa	3 d抗压强度/MPa	28 d抗压强度/MPa
标准值	≥3.5	≥7.4	≥17.0	≥42.5
实测值	5.4	8.0	29.5	46.8

表2 细骨料的技术性能指标

细度模数	表观密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	吸水率/%	含泥量/%
2.46	2 590	1 420	1.3	1.8

表3 试验所用混凝土配合比

kg/m ³						
水胶比	水泥	水	细骨料(砂)	粗骨料(石子)	粉煤灰	引气剂
0.45	378	170	667	1 185	0	0

1.2 试验方法

将选用的水泥、石子、砂以及掺合材料置于搅拌机内均匀搅拌,由于要掺入引气剂,试验过程中先将水与粉状引气剂均匀混合3 min左右,并在砂石料拌合过程中掺入。

为满足冻融循环、硫酸盐侵蚀等试验的需求,按照100 mm×100 mm×400 mm以及100 mm×100 mm×100 mm浇筑成型试块,将带模混凝土试块置于室内静置于24 h,之后拆模编号并置于标准养护室(温度(20±1)℃,湿度≥95%)养护,同时将试件分为3组(每组6块后取出,待其恢复至室温后再分别在标准条件下养护21 d与14 d。养护完成后将试块在5%浓度的硫酸钠溶液中浸泡4 d,再将试件放入盛有5%浓度硫酸钠的试件盒中,随后将试件盒放入冻融箱):第

1组标准养护至28 d预定龄期后取出以备试验,剩余两组分别在标准养护条件下养护7、14 d时将试件置于冻融箱中冻融循环1次进行冻融-盐侵试验。

依照规范要求,每25次冻融循环结束时将试件从冻融机取出并烘干后借助DT-16动弹仪和天平测量一次试块的动弹性模量与质量,每50次冻融循环烘干后借助WAW-1000电液伺服万能试验机测量一次试块的抗压强度,同时观察每组试件的表面损伤形态。

2 试验结果与分析

2.1 外观变化

图1为冻融-硫酸盐侵蚀耦合作用下,标准养护试件与不同时间进行早期冻融的试件的表面破坏变化照片。由图1中可以得到:标准养护的试件经过冻融100次后其表现现象尚且完好,但可以触摸到试件表面不再光滑;200次冻融破坏后试件表面的水泥浆剥落并开始显现出细骨料;300次冻融循环破坏后则可观察到试件的粗大骨料,此时试件的棱角也有部分脱落。7 d冻1次的试件与14 d冻1次的试件其外观变化方式与标准养护后的试件大体相似;但通过对比照片可以看出在相同冻融破坏次数下,这两组试件的破坏程度均比标准养护的试件略大,其中,7 d时冻1次的试件破坏程度为3组试件的最大者。

2.2 力学性能变化

为揭示硫酸盐侵蚀与冻融循环双重作用下混凝土力学性能的衰变规律,选取质量、动弹性模量与抗压强度为代表性指标,试验中每25次冻融循环测量动弹性模量与质量、每50次冻融循环测量抗压强度,通过对试验数据的整理分析得到盐侵-冻融作用下带不同初始冻融损伤度的混凝土力学性能衰变规律。

通过试验测量可得试件的初始质量不同,同时为便于比较试件的质量变化,需将数据进行归一化处理,因此,引入质量变化因子 W ^[13-14]并对试件的质量数据按照式(1)进行处理,将混凝土试件的质量变化和处理好后的质量损失率变化结果。使用点断线形式绘制出图2加以分析研究。

$$W = \frac{m_n - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为未进行冻融循环破坏时各组试件质量的平均值, m_n 为第 n 次冻融循环破坏后各组试件质量的平均值, W 为每组试件的质量变化因子。

由图2可以看到,所有试件的质量在冻融破坏次数逐渐增加的环境下,均表现出了先增加后减小的趋势。在冻融初期力学性能有所提高是因为外界侵入混凝土内部的硫酸根扩散到混凝土的微孔隙中,

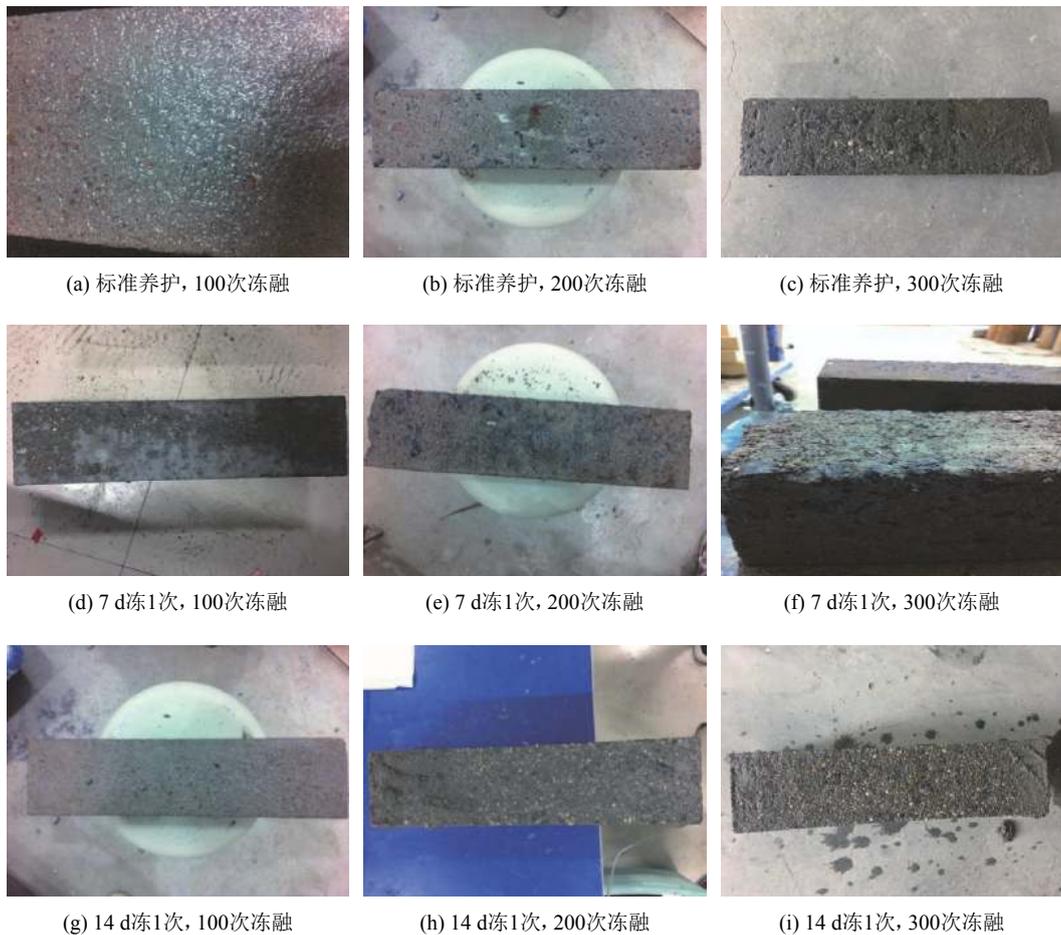


图 1 各试件不同冻融破坏次数时的破坏状态

Fig. 1 Failure state of specimens under different freeze-thaw cycles

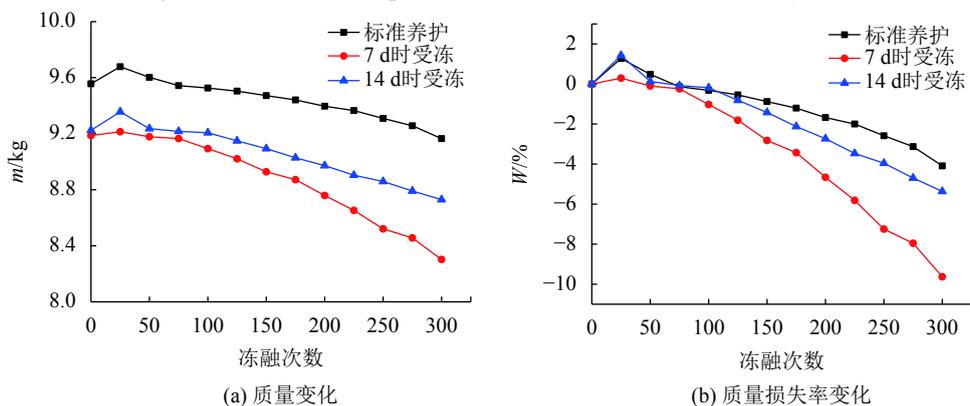
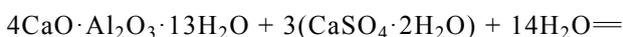
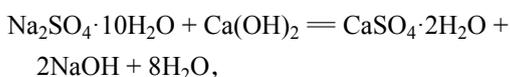


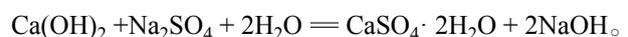
图 2 混凝土试件的质量变化

Fig. 2 Quality change of concrete specimens

与水泥水化产物发生化学反应造成膨胀性产物^[15], 依据生成物类型可分为钙矾石 ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) 和石膏 ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。其中, 钙矾石型硫酸盐侵蚀的化学反应式如下:



而且当混凝土中的 SO_4^{2-} 增加到一定浓度时, 不仅会有钙矾石产生, 而且会有石膏晶体析出。其反应方程如下:



硫酸盐结晶与侵蚀产物(钙矾石和石膏)的出现

促使混凝土内部结构更加紧实,会在一定程度上提高混凝土的各项性能。但随着冻融次数的增加,钙矾石晶体的增多使混凝土产生裂缝,石膏使混凝土变成溃散,加速了 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 向混凝土内部扩散速度,对混凝土的抗侵蚀能力产生不利影响,试件表面逐渐出现剥落、棱角消失等现象,质量开始逐渐减小;同时,试件的动弹性模量、抗压强度的变化原因与质量变化的原因相似,并展现出了相同的变化趋势,均为先增加后减少。

由图2(a)可以看出:在7 d与14 d时将试件进行冷冻后再进行正常养护这两种情况下的试件在未冻融时质量基本一致,并且与标准养护相比,两种早期冻融后的初始试件质量均会降低大约6%。在第300次冻融循环后,14 d时受冻的试件的质量变化趋势与标准养护条件下的试件基本类似,二者除初始质量有差距外,质量上升与下降速率基本一致,且在第300次冻融循环后试件质量均剩余初始质量的95%左右;7 d时受冻的试件质量损失约为18.7%,结合图2(a)与表3可得该养护方式的试件质量与体积损耗较大。由图2(b)可知:在第75次冻融循环后,7 d时受冻试件的折线斜率明显高于其他养护条件,表明该情况下试件的质量损失速度为三者中最高;在75次冻融循环后试件的质量损失率由大到小为标准养护>14 d时受冻>7 d时受冻,随着冻融次数的增多,养护时越早受冻则最终试件的质量损耗越大。

混凝土试件的动弹性模量与抗压强度变化结果如图3、4所示。

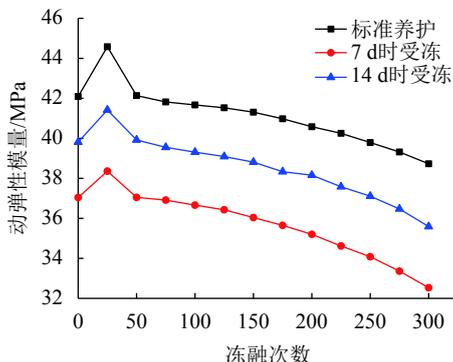


图3 混凝土试件动弹性模量变化

Fig. 3 Dynamic modulus of elasticity of concrete

由图3可知:在28 d养护结束后,标准养护试件与早期冻融过的试件初始动弹性模量由大到小依次表现为标准养护(100%)>14 d时冻1次(92.8%)>7 d时受冻冻1次(88.1%)。在第25次冻融循环时标准养护试件的动弹性模量增长幅度呈现为3.76%,14 d时受冻试件增长幅度呈现为3.54%,7 d时受冻试件的增长幅度呈现为3.28%,这表明了试件在养护初期遭到低温破坏会导致试件较易出现细微裂缝等缺陷。这是

由于早期冻融的混凝土试件其正常水化热过程突然受到外界低温的影响,试件内部与外表面形成了较大的温差,其胀缩现象不再平衡,混凝土的细微裂缝在拉应力的作用下开始出现,在后续冻融破坏中为硫酸盐离子的侵入提供了更多的侵蚀通道与侵蚀空间,同时也对侵蚀生成物(钙矾石和石膏)的产生起到了催化作用。

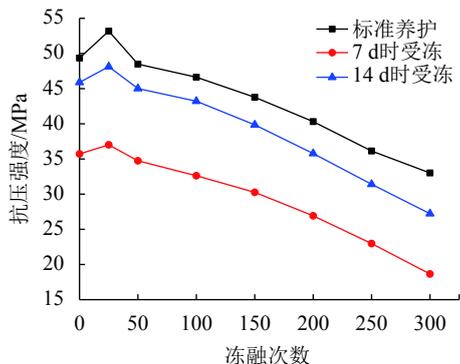


图4 混凝土试件抗压强度变化

Fig. 4 Compressive strength of concrete

在第50次冻融循环后3组混凝土试件的动弹性模量均恢复至初始状态,但由于养护前期冻融对试件造成的不良影响,随着冻融循环破坏次数的增加,试件的动弹性模量出现了“凸”形下跌,早期冻融后的试件下跌程度略高,这在第7天遭受冷冻的试件中表现的尤为明显。

在第300次冻融循环破坏后,标准养护后的试件的动弹性模量表现为初始状态的92.1%,14 d时冻1次的试件损耗程度与标准养护状态下的试件相比无较大差别,300次冻融循环后动弹性模量表现为初始状态的91.7%;7 d时冻1次的试件损耗程度与另外两种试件相比差距则较大,其剩余动弹性模量表现为初始状态的88.7%,并且这种差距会随着冻融次数的增加而增大。

由图4可知,在第7天冷冻过的试件经后期标准养护后,抗压强度达到28 d标准养护的72.3%,而14 d时冻1次的试件其初始强度达到标准养护的93.1%,这与实际施工过程中常用到的仅养护7 d或14 d时的完成强度比例基本相似,表明因养护不当导致的损伤是无法由后续标准养护进一步修补的,该过程是不可逆转的。由于正常水化热中断,混凝土的细微裂缝出现,在没有仿生自修复的前提下损伤一旦形成则无法还原。这也为实际工程如何依据可用养护时间选择正确的配合比提供了依据。

试件的抗压强度在第25次冻融循环时也表现出增长趋势,增长幅度由大到小为标准养护>14 d时冻1次>7 d时冻1次,这反应了抗压强度的增长幅度

与早期冻融时间有着密切联系,由于水化所产生的热量随时间增多而减少,因此对试件越晚进行早期冻融破坏,水化热导致的裂缝数量越少且出现时间也有一定推迟,盐侵产生的膨胀性产物则可以在裂缝出现前起到较好的填补作用。

第50次冻融循环后,3组混凝土试件的抗压强度均大体恢复至初始状态。整体来看,标准养护的试件与14 d时冻1次试件的抗压强度变化过程基本类似,曲线重合度较高;7 d时冻1次的试件抗压强度损耗则略大,损耗值与初始状态相比达到了47.8%,明显多于14 d时受冻试件的损耗值(40.6%)和标准养护试件的损耗值(33.1%)。因此可以得出结论,养护条件的标准化与试件抗压强度的初始和保持呈现正比关系,因早期冻融所造成的初始损伤对试件后期力学性能的发展有阻碍关系。

2.3 内部缺陷观测

为从混凝土试件的内部变化验证盐侵-冻融时混凝土力学性能的衰减与其变形和裂隙发展密切相关,采用ZBL-U520非金属超声波检测仪对混凝土试件进行无损检测,探明试件的内部缺陷与其性能变化的对应关系。

混凝土试件具有两对相对相互平行的侧面,因此可采用对测法对混凝土进行超声法内部缺陷检测,即在试件的相对两个侧面上分别划分等间距的20个测点并编号,测距为10 cm,具体测线布置及测试过程,见图5、6。

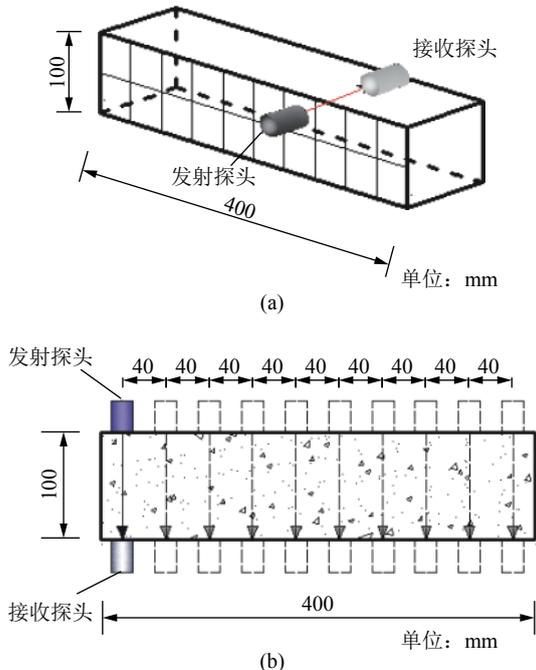


图 5 测线布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of measuring line layout

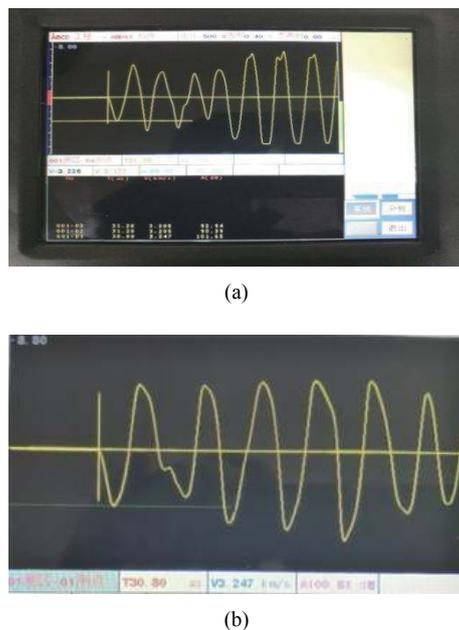


图 6 非金属超声检测混凝土内部缺陷波线图

Fig. 6 Non-metallic ultrasonic testing of concrete internal defect wave diagram

对标准养护试件与不同时间进行早期冻融的试件,分别在其冻融循环0次、150次、300次时测取超声脉冲传播速度,依据各测点声速值所绘制混凝土内部缺陷云图(图7~9);对各组试件的40个测值求取平均数,利用Surfer11.0软件对数据做等值线图,得到不同冻融次数的平均超声脉冲传播速度值见表4。

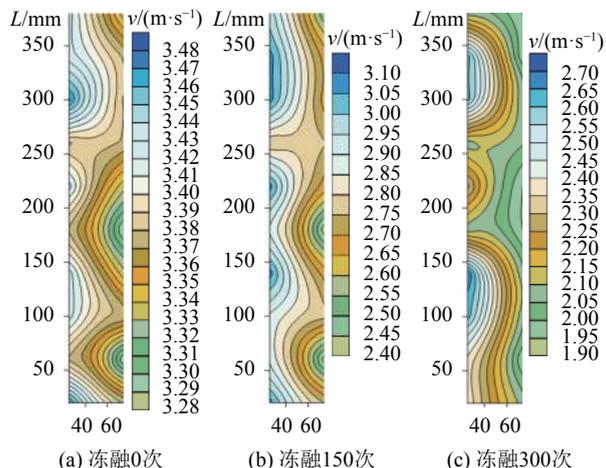


图 7 标准养护混凝土内部缺陷云图

Fig. 7 Inner defect cloud map of standard curing concrete

超声脉冲传播速度的快慢直接反映了混凝土的密实程度,对于技术条件相同的混凝土试件来说,穿过试件的超声波声速大则混凝土密实,宏观表现为混凝土力学性能表现越好;反之,则混凝土不密实且力学性能较差。

由图7~9的横向对比可知,在冻融循环之前,试

件内部密实程度虽然存在一定差异,但该差异属于振捣作用下无法避免的情况,由于振捣过程中粗骨料易受振动作用向试件上方移动,导致试件下部的细骨料较多,因此试件的超声波速度表现为“上大下小”。在经历150与300次冻融循环之后,试件整体各测点的声速值均有所下降,表明冻融循环作用对试件内部结构有一定破坏,试件局部出现一些空洞区域,即缺陷区;缺陷区域的面积随冻融次数的增加有明显扩大趋势,导致了混凝土内部出现疏松状区域,严重影响混凝土力学性能。

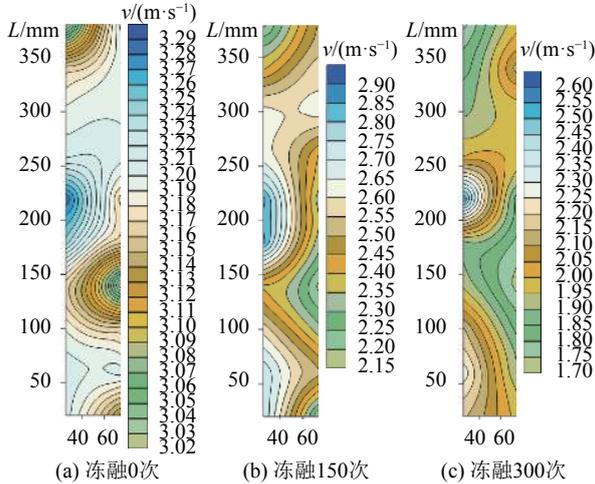


图8 第14天冻融1次混凝土内部缺陷云图

Fig. 8 Inner defect cloud map of concrete during freezing-thawing on the 14th day

通过纵向对比图7~9得出早期冻融更易破坏混凝土试件的下方部位(75 cm),这是由于试件下部细骨料较多,彼此间的粘合性在外界作用下更易遭到

表4 不同冻融次数下混凝土的平均超声脉冲传播速度值

Tab. 4 Average ultrasonic pulse propagation velocity of concrete under different freeze-thaw times

项目	平均超声脉冲传播速度值/(m·s ⁻¹)			损伤值(v_0-v_{300})
	冻融0次 v_0	冻融150次 v_{150}	冻融300次 v_{300}	
标准养护	3.472	3.074	2.386	1.086
14 d时冻1次	3.205	2.744	2.058	1.147
7 d冻1次	3.049	2.382	1.613	1.436

为验证超声法混凝土内部缺陷检测结果,以经历150次冻融循环的标准养护混凝土试件为例,采用SCE-MATS-BPA非金属多功能无损测试仪进一步检测,基于弹性波雷达法的波长较长、检测范围大等优点,检测结果使用图形表示,直观清晰,具体测试过程及结果见图10。由所得结果可知检测结果与超声法混凝土内部缺陷检测结果基本一致,验证了本试验混凝土内部缺陷检测的正确性。

通过对图7、10结果中的内部缺陷区的发展过程与试件对应力学性能的衰减过程进行对比分析,可

破坏,且越早对混凝土进行早期冻融损伤,试件的初始缺陷区面积越大。

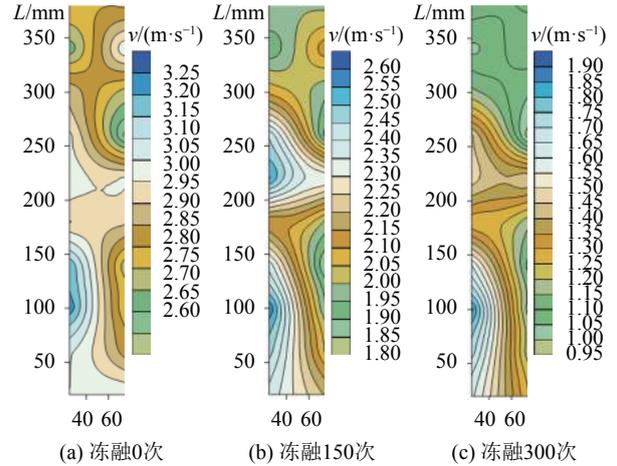


图9 第7天冻融1次混凝土内部缺陷云图

Fig. 9 Inner defect cloud map of concrete during freezing-thawing on the 7th day

依据表4中数据,在冻融0次时,初始超声脉冲传播速度由大到小依次为标准养护>14 d时冻融1次>7 d时冻融1次;300次冻融循环后,试件的超声脉冲传播速度损伤值排序仍保持该顺序,因此推出早期冻融造成的损伤对混凝土超声脉冲传播速度的不利影响较大。同时结合混凝土内部缺陷区面积缩小的规律,进一步得到早期冻融对混凝土的宏观力学性能的发展不利,初始冻融损伤加速了混凝土各项力学性能的衰减过程,且早期冻融选取的时间早晚直接决定了混凝土后期超声脉冲传播速度与力学性能表现的好坏,这与试验结果相一致。

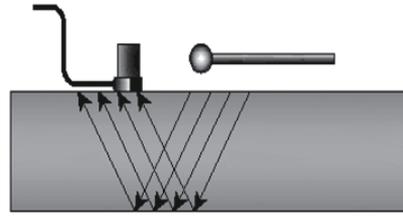
得混凝土力学性能衰退的根本原因是其内部空洞缺陷面积的不断扩大,随着试件密实度的不断降低,微小孔隙与裂缝开始不断发展、融合、贯通,进而导致宏观裂缝的出现与发展;在此期间,反映混凝土耐久性的质量、动弹性模量、抗压强度也受到空洞和裂缝的影响开始衰减,且混凝土内部空洞缺陷越大则力学性能表现越差。

2.4 数据处理

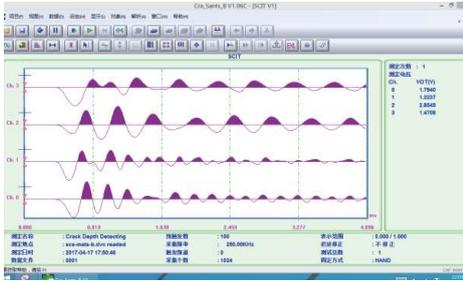
混凝土试件的宏观力学性能可以较直观、全面地反应试件的完整状态,为了进一步研究早期养护



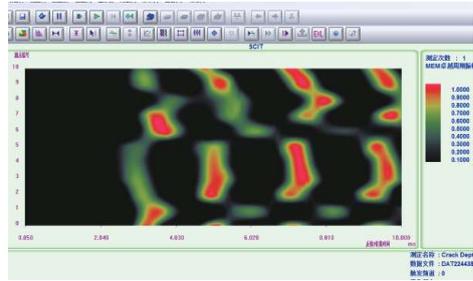
(a) 混凝土多功能无损测试仪



(b) 弹性波雷达法测试方案



(c) P波波动图



(d) 断面雷达扫描图

图 10 混凝土多功能无损测试仪检测混凝土内部缺陷过程及结果

Fig. 10 Process and results of concrete internal defects with concrete multifunctional nondestructive tester

条件对混凝土后期动弹性模量和抗压强度的直观影响, 现依据试验结果对破坏了早期养护条件的混凝土试件进行定量定性分析。依据损伤力学理论分别将试件的动弹性模量 E 、抗压强度 σ 定义为损伤变量^[16], 按照式(2)、(3)对损伤变量的损伤过程进行分析。

$$D = \frac{E_n - E_0}{E_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$S = \frac{\sigma_n - \sigma_0}{\sigma_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: E_0 、 σ_0 为未进行冻融循环破坏时各组试件动弹性模量、抗压强度的平均值, MPa; E_n 、 σ_n 为第 n 次冻融循环破坏后各组试件动弹性模量、抗压强度的平均值, MPa; D 、 S 为每组试件的动弹性模量、抗压强度损伤因子。

由图3、4中可看出, 试件在第25次冻融循环中其力学性能会有所提高, 直至第50次冻融循环后方降低至初始状态, 由于试验中混凝土的各项力学性能整体表现为下降趋势, 为避免前期冻融循环对研究力学性能整体变化的无关影响, 故将试件前期冻融循环所表现出有所提高的力学性能变化过程抛弃, 不对该次数下的力学性能损伤程度进行分析, 主要研究第50次冻融循环之后的试件力学性能的损伤演变过程。依据式(2)、(3)计算标准养护与不同时间进行早期冻融的试件在不同冻融循环次数时抗压强度与动弹性模量所对应的损伤因子, 将结果绘制曲线, 并利用Origin9.0软件对曲线进行非线性拟合, 结果见图11、12。

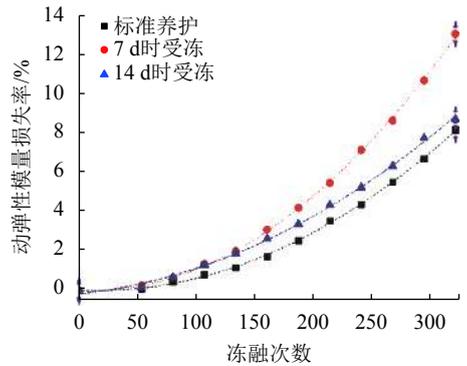


图 11 动弹性模量损失率变化拟合

Fig. 11 Fitting of dynamic modulus loss rate

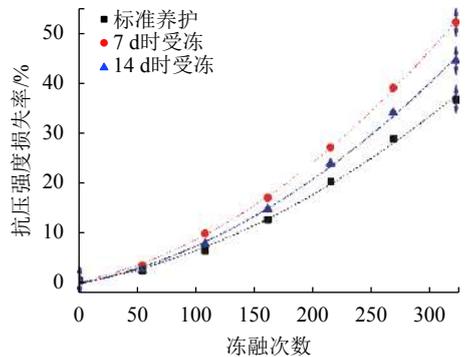


图 12 抗压强度损失率变化拟合

Fig. 12 Fitting of compressive strength loss rate

图11、12中展现出的数据拟合关系十分明显, 代表了不同养护条件下试件动弹性模量与抗压强度所对应的损伤因子与冻融循环次数有着一定函数关系, 利用Origin9.0拟合所得函数形式见式(4)、(5):

$$D = a_1 \cdot n + b_1 \cdot n^2 + c_1 \quad (4)$$

$$S = a_2 \cdot n + b_2 \cdot n^2 + c_2 \quad (5)$$

式中: D 、 S 为每组试件的动弹性模量、抗压强度损伤因子; n 为冻融循环次数; a_i 、 b_i 、 c_i 为与损伤因子相关的数学参数,具体数值见表5、6。

由表5、6可知标准养护试件与不同时间进行早期冻融的试件动弹性模量与抗压强度的拟合函数表现出的相关指数 R^2 均大于0.989,表明该拟合函数可以较好地反映出试件在不同养护条件下各力学性能与冻融循环次数所对应的损伤演变过程。拟合函数的提出可以为后期混凝土结构的实际服役寿命预测提供一定理论依据。

表5 动弹性模量损伤因子表达式参数

Tab. 5 Expression parameters of dynamic modulus's elasticity damage factor

养护条件	$a_1/10^{-3}$	$b_1/10^{-5}$	$c_1/10^{-2}$	相关指数 R^2
标准养护	-2.830	9.494	3.776	0.997
7 d时冻1次	-2.860	1.454	3.354	0.989
14 d时冻1次	5.590	7.556	-6.213	0.996

表6 抗压强度损伤因子表达式参数

Tab. 6 Expression parameters of compressive strength's elasticity damage factor

养护条件	$a_2/10^{-2}$	$b_2/10^{-4}$	$c_2/10^{-1}$	相关指数 R^2
标准养护	4.312	2.427	-5.526	0.997
7 d冻1次	4.961	3.707	-2.340	0.994
14 d时冻1次	4.565	3.124	-5.518	0.998

结合图11、12与表5、6可知初始损伤对混凝土的力学性能表现存在一定的“超前效应”,在存在相似损伤程度的前提下,对应的冻融次数依次为标准养护>14 d时受冻>7 d时受冻,7 d时冻融1次的试件更容易达到一定的损伤程度,即初始损伤加剧了后期盐侵-冻融对混凝土的破坏作用。

通过对式(4)、(5)的导数分析,可得每组试件的动弹性模量与抗压强度损伤速率为式(6)、(7):

$$\frac{\partial D}{\partial n} = a_1 + 2b_1 \cdot n \quad (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial n} = a_2 + 2b_2 \cdot n \quad (7)$$

导数公式极其有效地反映出冻融次数越多,损伤曲线的斜率越大,即试件的力学性能损伤越大且速度越快,试件的动弹性模量和抗压强度损伤与冻融循环次数的对应关系是加速对应状态。在冻融循环次数相同时,试件的力学性能损伤度表现出的大小关系为标准养护>14 d时冻1次>7 d时冻1次。

进一步对每组试件的动弹性模量损伤因子 D 和

抗压强度损伤因子 S 的整理分析,发现二者间存在着某种函数关系,再次利用软件对二者数据组进行拟合,结果见图13。

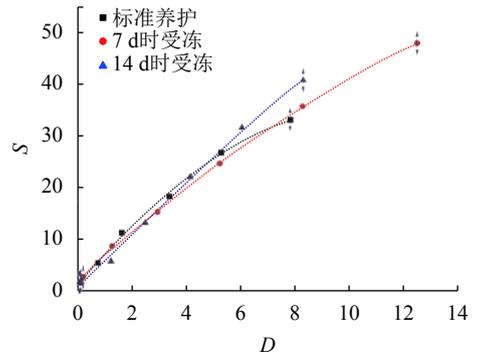


图13 力学性能损伤因子间的拟合关系曲线

Fig. 13 Fitting curves of factors of mechanical properties
动弹性模量损伤因子 D 和抗压强度损伤因子 S 拟合出的关系式如式(8)所示:

$$S = a_3 \cdot D + b_3 \cdot D^2 + c_3 \quad (8)$$

式中, a_3 、 b_3 、 c_3 为与损伤因子相关的数学参数,具体数值见表7。

表7 力学性能拟合关系曲线表达式参数

Tab. 7 Expression parameters of mechanical property fitting curves

养护条件	a_3	b_3	c_3	相关指数 R^2
标准养护	6.187	-0.266	1.148	0.997
7 d时冻1次	4.858	-0.094	1.932	0.994
14 d时冻1次	5.466	-0.063	0.1967	0.996

表7中,标准养护试件与不同时间进行早期冻融的试件力学性能的损伤因子拟合后的相关指数 R^2 大于0.994,表明该拟合函数的可信度与完整度较强。在实际工程和后续工作中若受到场地或仪器限制,只能获取其中一个力学性能的数值,则可以通过该拟合函数推导出另一个力学性能的数值,大大减小了数据获取的困难程度。

式(8)的求导公式为式(9):

$$\frac{\partial S}{\partial D} = a_3 + 2b_3 \cdot D \quad (9)$$

对其分析可发现抗压强度损伤因子 S 随着动弹性模量损伤因子 D 的持续增大,其增长趋势略微减缓,其中标准养护试件的更能表现这一过程。

3 结论

1) 早期冻融造成的初始损伤对混凝土的质量、动弹性模量、抗压强度等力学性能有着一定不利影响,在养护期间越早对试件进行冻融破坏越不利于试件力学性能的后期发展。未冻融时各力学性能的

初始值与冻融引起的损失值均表现出了标准养护 > 14 d 时冻 1 次 > 7 d 时冻 1 次的排序关系。在盐冻作用下,带初始冻融损伤的混凝土力学性能变化与无初始损伤混凝土相比有着明显“超前效应”,即 3 组混凝土试件在力学性能取值相同时,最早进行早期冻融的混凝土达到该取值所需的冻融次数最少,带初始冻融损伤的混凝土力学性能更易遭受盐侵-冻融破坏。

2) 通过混凝土内部缺陷云图的对比得知,混凝土超声脉冲传播速度的初始值与损伤值的排序关系仍与 1) 中排序一致,即由早期冻融引起的带初始损伤混凝土宏观性能与微观性能规律一致,表明内部空洞缺陷区与裂缝的发展是超声脉冲传播速度发生改变的根本原因,缺陷区与裂缝的扩展意味着混凝土密实状况的恶化与超声脉冲传播速度的衰减;进而推出在宏观表现方面,空洞与裂缝所占比例越大,混凝土的各项力学性能越易遭到破坏。

3) 依据损伤力学理论,将动弹性模量与抗压强度分别作为损伤变量,对其损伤过程进行回归分析,得到了带不同初始冻融损伤的混凝土力学性能随冻融次数变化的损伤演变关系式,该关系式可作为相似环境相似早期冻融条件下混凝土力学性能衰变的通用公式。同时,通过拟合 3 组试件的抗压强度损伤因子 S 与动弹性模量损伤因子 D ,得到了不同初始冻融破坏下混凝土不同损伤因子间的关系式,解决了在仪器短缺等情形下只能获得一个力学性能损伤规律的局限性问题。

参考文献:

- [1] Li Z, Wang N, Zhang X, et al. High precipitation and low evaporation resulted in high lake levels of the Juyanze paleolake, Northwest China, during 34-26 cal kyr BP[J]. *Climate Research*, 2016, 69(1/2/3): 193-207.
- [2] Suleiman A R, Nehdi M L. Exploring effects of supplementary cementitious materials in concrete exposed to physical salt attack[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2017, 69(11): 576-585.
- [3] Xu Cundong, Tian Zixun, Xie Jialin, et al. Study on the durability of concrete under the action of sulfate attack and freeze-thaw cycle[J]. *Concrete*, 2017(6): 21-23. [徐存东, 田子荀, 谢佳琳, 等. 硫酸盐侵蚀-冻融循环复合作用下混凝土材料耐久性研究[J]. *混凝土*, 2017(6): 21-23.]
- [4] Shuldyakov K, Kramar L, Trofimov B, et al. Superplasticizer effect on cement paste structure and concrete freeze-thaw resistance[C]. AIP Publishing LLC, 2016: 768-769.
- [5] Piasta W. Analysis of carbonate and sulphate attack on con-

- crete structures[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 79(1): 606-614.
- [6] Hoppe F J, Souza D J, Medeiros M H F, et al. Concrete attack by sodium sulfate: Mineral additions as a mitigation tool[J]. *Cerâmica*, 2015, 61(358): 168-177.
- [7] Qiao Hongxia, Zhu Binrong, Chen Dingshan. Experimental study of the deterioration mechanism of concrete in xining saline soil area[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2017(4): 805-815. [乔宏霞, 朱彬荣, 陈丁山. 西宁盐渍土地区混凝土劣化机理试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2017(4): 805-815.]
- [8] Siad H, Lachemi M, Şahmaran M, et al. Preconditioning method for accelerated testing of concrete under sulfate attack[J]. *ACI Materials Journal*, 2016, 113(4): 493-504.
- [9] Yang Yonggan, Zhang Yunsheng, She Wei, et al. Deterioration mechanism of concrete with initial damage exposed to sulfate attack[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(5): 705-711. [杨永敢, 张云升, 余伟, 等. 带初始损伤混凝土受硫酸盐侵蚀劣化的机理分析[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(5): 705-711.]
- [10] Colombi P, Fava G, Sonzogni L. Effect of initial damage level and patch configuration on the fatigue behaviour of reinforced steel plates[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2015, 38(3): 368-378.
- [11] Liu Juanhong, Zhao Li, Ji Hongguang. Influence of initial damage on degradation and deterioration of concrete under sulfate attack[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(8): 1278-1287. [刘娟红, 赵力, 纪洪广. 初始损伤对混凝土硫酸盐腐蚀劣化性能的影响[J]. *工程科学学报*, 2017, 39(8): 1278-1287.]
- [12] Pang Sen, Diao Bo, Ye Yinghua, et al. Effect of seawater wet-dry cycles on mechanical performance of RC beams with initial damage[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(5): 1004-1012. [庞森, 刁波, 叶英华, 等. 海水干湿循环对初始损伤 RC 梁力学性能的影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(5): 1004-1012.]
- [13] Kim Y R, Khil B S, Jang S J, et al. Effect of barium-based phase change material (PCM) to control the heat of hydration on the mechanical properties of mass concrete[J]. *Thermochimica Acta*, 2015, 613: 100-107.
- [14] Li Jingpei, Li Xianfeng, Li Lin, et al. Axial bearing behavior of deteriorated foundation pile under sulfate attack[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2016, 50(11): 1761-1766. [李镜培, 李险峰, 李林, 等. 硫酸盐侵蚀损伤劣化基桩竖向承载特性[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(11): 1761-1766.]
- [15] Gouder C, Saravanan U. Modeling diffusion of sulfate through concrete using mixture theory[J]. *Acta Mechanica*, 2016, 227(11): 3123-3146.
- [16] Siad H, Lachemi M, Şahmaran M, et al. Preconditioning method for accelerated testing of concrete under sulfate attack[J]. *ACI Materials Journal*, 2016, 113(4): 222-225.

(编辑 黄小川)

引用格式: Xu Cundong, Cheng Yu, Wang Rongrong, et al. Analysis of performance deterioration of concrete material with initial freeze-thaw damage under salt-freezing condition[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 17-26. [徐存东, 程昱, 王荣荣, 等. 带初始冻融损伤的混凝土材料受盐冻作用下性能劣化分析[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(1): 17-26.]