

DOI:10.11918/201910059

冻融环境下沙漠砂对混凝土轴心受压力学性能的影响

刘海峰, 马映昌, 张润奇, 邵 蔚, 马菊荣

(宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021)

摘 要: 为研究沙漠砂对混凝土抗冻性能的影响,采用快速冻融方法,进行掺沙漠砂混凝土冻融后轴心抗压强度试验,得到不同冻融循环作用下掺沙漠砂混凝土破坏特征和应力-应变曲线,分析不同冻融循环下掺沙漠砂混凝土表面损伤特征、质量损失率、动弹性模量损失率和超声波波速损失率的变化规律. 结果表明:随着冻融循环次数增加,掺沙漠砂混凝土质量损失率变化较小,动弹性模量损失率、超声波波速损失率、相对峰值应变和极限应变均增大,相对峰值应力和横向变形系数均减小,弹性模量先增大后减小;在相同冻融循环次数下,掺沙漠砂混凝土弹性模量损失率、超声波波速损失率和相对峰值应变均小于普通混凝土,相对峰值应力、横向变形系数和弹性模量比普通混凝土高. 采用过镇海提出的单轴受压本构模型拟合得到应力-应变全曲线方程,分析冻融循环对应力-应变曲线控制参数的影响,可对沙漠砂混凝土结构的抗冻性能进行分析.

关键词: 混凝土; 沙漠砂; 冻融循环; 轴心抗压; 应力-应变曲线

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)03-0101-09

Influence of desert sand on axial compression behavior of concrete under freezing and thawing environment

LIU Haifeng, MA Yingchang, ZHANG Runqi, SHAO Wei, MA Jurong

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: To study the influence of desert sand on the frost resistance of concrete, the compression strength experiment of desert sand concrete after freezing and thawing test was carried out by rapid freeze-thaw method. The stress-strain curves and failure characteristics of desert sand concrete after different freeze-thaw cycles were obtained. The variations of surface damage characteristics, mass loss rate, dynamic elastic modulus loss rate, and ultrasonic wave velocity loss rate of desert sand concrete were analyzed. Experimental results show that with the increase of the number of freeze-thaw cycles, the mass loss rate of desert sand concrete had little change; the dynamic elastic modulus loss rate, ultrasonic wave velocity loss rate, relative peak strain, and ultimate strain increased; the relative peak stress and transverse deformation coefficient declined; the elastic modulus increased firstly and then decreased. With the same number of freeze-thaw cycles, the dynamic elastic modulus loss rate, ultrasonic wave velocity loss rate, and relative peak strain of desert sand concrete were less than those of ordinary concrete. However, the relative peak stress, transverse deformation coefficient, and elastic modulus of desert sand concrete were higher than those of ordinary concrete. On the basis of the uniaxial compression constitutive model of concrete put forth by Guo Zhenhai, the equation of stress-strain full curves was formulated. The influence of freeze-thaw cycles on the control parameters of stress-strain curves was analyzed, which can be applied for the frost resistance analysis of desert sand concrete structures.

Keywords: concrete; desert sand; freeze-thaw cycle; axial compression; stress-strain curve

中国北方地区冬季气候寒冷,具有持续时间长和昼夜温差大的特点,大温差引起的冻融循环已成为影响混凝土耐久性的一个主要因素^[1]. 目前针对混凝土抗冻性能方面国内外学者进行了许多研究^[2-5]. 文献[2]分析了水灰比、含气量和冻融循环

次数对混凝土动弹性模量、抗折强度、抗压强度和劈裂抗拉强度的影响;文献[3]利用替代率为 0%、20%、50%和 100%再生细骨料等量替代天然细骨料,进行了不同冻融循环次数下混凝土抗冻性能研究;文献[4]通过试验研究了冻融后混凝土受压性能,分析了混凝土强度等级、冻融循环次数、相对动弹性模量对混凝土受压性能的影响;文献[5]对荷载-冻融耦合作用下充填层自密实混凝土的耐久性进行了试验研究,分析了在冻融循环作用、荷载-冻融循环耦合作用下自密实混凝土峰值应力、峰值应变等随冻融循环次数的变化规律.

收稿日期: 2019-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(11162015);宁夏自然科学基金(2020AAC03044);宁夏高等学校科学技术研究项目(NGY2020104);宁夏高等学校一流学科建设(水利工程学科)资助项目(NXYLXK2017A03)

作者简介: 刘海峰(1975—),男,博士,教授

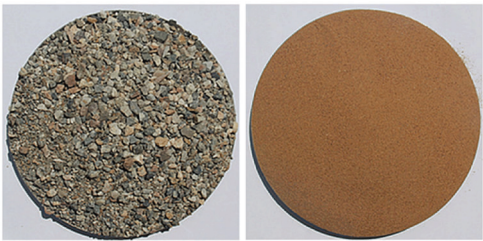
通信作者: 刘海峰,liuhaifeng1557@163.com

砂是混凝土主要的原材料之一. 随着中国西部地区基础建设项目的增多,对砂的需求量逐渐增大. 过度开采河道与矿山作为建筑用砂,严重破坏了周围的生态环境. 在西部沙漠周边地区,研究者针对利用沙漠砂配制的混凝土性能进行了一些研究^[6-9],结果表明:沙漠砂可以代替细骨料配制混凝土应用于实际工程结构中. 文献[6]对利用澳大利亚沙漠砂制备的沙漠砂混凝土进行了力学性能研究,结果表明:当砂灰比低于 1.14 时,沙漠砂混凝土强度明显高于普通混凝土;文献[7]对用毛乌素沙地砂替代细骨料配制的沙漠砂混凝土进行了研究;文献[8]利用霍普金森压杆(SHPB)试验装置对沙漠砂混凝土进行了冲击压缩试验研究;文献[9]通过设计正交试验对高温后沙漠砂高强混凝土进行了抗压强度试验,确定了沙漠砂高强混凝土最佳配合比.

中国西部地区有丰富的沙漠砂资源,利用沙漠砂作为替代砂配制适合工程应用的沙漠砂混凝土,对于减缓沙漠化压力、降低工程造价和保护环境具有重要意义. 虽然研究者对高温后沙漠砂混凝土性能进行了许多研究^[7-9],但是针对冻融环境下掺沙漠砂混凝土轴心受压力学性能的研究较少. 本文通过快速冻融方法,进行掺沙漠砂混凝土冻融后轴心抗压强度试验,得到不同冻融循环作用下掺沙漠砂混凝土破坏特征和应力-应变曲线,分析不同冻融循环下掺沙漠砂混凝土外观特征、质量损失率、动弹性模量损失率及超声波波速损失率的变化,为寒冷地区沙漠砂混凝土的工程应用提供理论依据和技术支撑.

1 试 验

试验所用水泥为宁夏赛马牌普通硅酸盐水泥,强度等级 42.5R,初凝时间为 142 min,终凝时间为 198 min,3 d 与 28 d 抗压强度分别为 28.2、52.7 MPa;3 d 和 28 d 抗折强度分别为 5.8、7.9 MPa;粗骨料采用宁夏镇北堡生产的粒径为 5~20 mm 人工碎石,由粒径为 10~20 mm 大石子与 5~10 mm 小石子按照质量比 7:3 混合而成;中砂采用当地人工水洗砂;沙漠砂取自宁夏盐池县毛乌素沙地,其性能指标和外观特征见表 1 和图 1,级配曲线如图 2 所示;采用减水率为 25% 以上的粉末状聚羧酸高性能减水剂.



(a) 人工水洗砂 (b) 沙漠砂

图 1 中砂和沙漠砂外观对比

Fig.1 Appearance contrast between medium sand and desert sand

表 1 细骨料性能

Tab.1 Properties of fine aggregate

细骨料	堆积密度/ (g · cm ⁻³)	表观密度/ (g · cm ⁻³)	含泥 质量分数/%	细度模数
中砂	1.545	2.543	0.72	3.43
沙漠砂	1.400	2.620	0.14	0.24

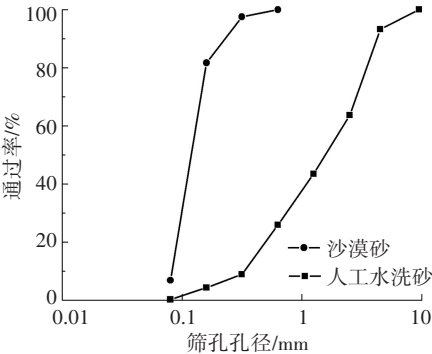


图 2 细骨料级配曲线

Fig.2 Gradation curves of fine aggregate

在本文前期研究基础上^[8-9],用沙漠砂等量替代中砂,配制水胶比为 0.50,砂率为 35%,强度等级为 C35 混凝土,具体配合比和材料用量见表 2.

试件尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm,共制作 18 个沙漠砂替代率为 50% 掺沙漠砂混凝土试件和 18 个普通混凝土试件. 经搅拌、成型、脱模后,放入标准养护室内养护 24 d,再放入 20 ℃±2 ℃水中浸泡 4 d,使试件完全处于饱和状态^[10]. 试件达到 28 d 龄期后分别进行冻融循环 25、50、75、100 和 125 次掺沙漠砂混凝土快速冻融循环试验,测定其在不同冻融循环次数下质量损失、动弹性模量和超声波波速. 冻融试验采用天津市港源试验仪器厂生产的 TDR-28 型快速冻融试验机.

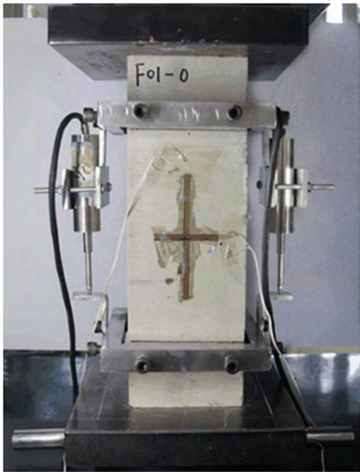
表 2 混凝土配合比

Tab.2 Mix ratio of concrete

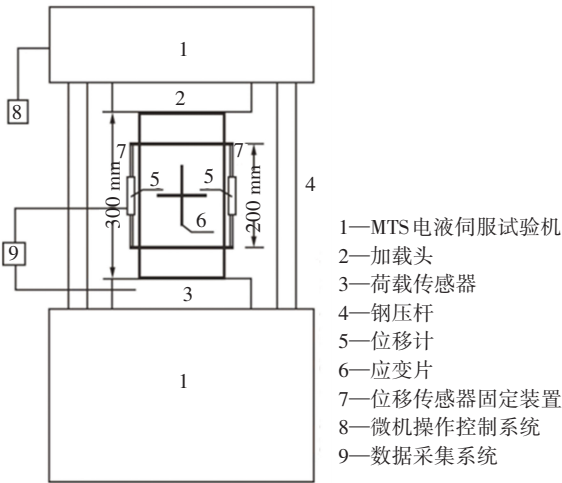
编号	配合比		单位体积材料质量/(kg · m ⁻³)							塌落度/ mm	含气体积 分数/%	抗压强 度/MPa
	水胶比	沙漠砂替 代率/%	水	水泥	粗骨料		细骨料		减 水 剂			
					大石子	小石子	水洗砂	沙漠砂				
F01	0.5	0	195	390	826	354	635	0	0.37	147	3.1	41.2
F04	0.5	50	195	390	826	354	317	318	0.62	152	2.9	43.1

冻融后试件进行掺沙漠砂混凝土轴心抗压强度试验,试验加载设备采用 MTS 微机控制电液伺服万能试验机,最大负荷为 1 000 kN,精度为 0.001 N,如图 3 所示. 加载方式采用应力控制,加载速率为 0.5 MPa/s;数据采集仪采用江苏东华测试技术股份有限公司生产的 DH3820 高速静态应变测试分析系

统,采样频率为 10 Hz,应变测量范围为 ± 0.05 ,分辨率为 5×10^{-7} ;采用江苏东华测试技术股份有限公司制造的 5G101 型位移传感器,灵敏系数为 2.00,量程为 50 mm,精度为 5×10^{-4} mm;应变片电阻为 120 Ω ,轴向应变片长度为 100 mm,横向应变片长度为 50 mm,应变片采用十字交叉粘贴.



(a) 试验加载图



(b) 加载示意图

图 3 MTS 微机控制电液伺服万能试验机

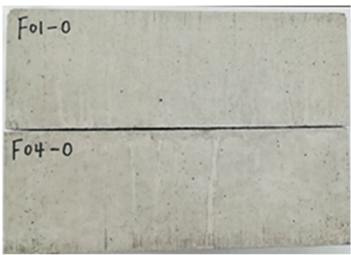
Fig. 3 MTS microcomputer control electro-hydraulic servo universal testing machine

2 试验结果与分析

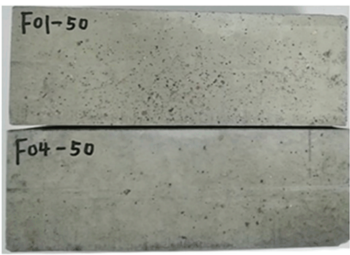
2.1 冻融后外观特征

图 4 为冻融前后普通混凝土与掺沙漠砂混凝土外观特征. 由图 4 可知,冻融循环前,两组混凝土试

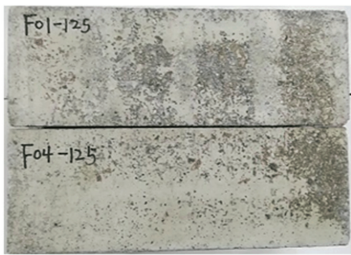
件表面平整光滑,无掉角、裂缝;冻融循环后,部分水泥浆剥蚀,试件表面粗糙,出现微孔洞、微裂纹;随着冻融循环次数增加,水泥浆剥蚀加重,试件表面孔洞、裂纹增多. 在相同冻融循环次数下,掺沙漠砂混凝土试件表面剥蚀劣化程度比普通混凝土轻.



(a) 冻融前



(b) 冻融循环 50 次



(c) 冻融循环 125 次

图 4 冻融前后混凝土外观特征

Fig.4 Appearance characteristics of concrete before and after freeze-thaw cycles

2.2 质量损失率

质量损失率为冻融前、后试件的质量差与冻融前试件的质量比. 采用量程为 30 kg、精度为 1 g 的电子秤测得不同冻融循环次数后试件质量,将 3 个试件质量损失率的平均值作为该组试件的质量损失率. 图 5 为普通混凝土和掺沙漠砂混凝土质量损失率与冻融循环次数之间关系. 由图 5 可知,在 125 次冻融循环内,两种混凝土质量损失均很小,低于 0.33%.

2.3 动弹性模量损失率

采用 DT-15 型混凝土动弹性模量试验仪,测得不同冻融循环次数下混凝土动弹性模量,每个测点重复 3 次,测量结果的平均值作为试验测定值. 动弹性模量损失率为冻融前、后测得的动弹性模量之差与冻融前测得的动弹性模量的比值. 图 6 为动弹性模量损失率与冻融循环次数关系. 两组混凝土动弹性模量损失率随着冻融循环次数的增加而逐渐增大,掺沙漠砂混凝土动弹性模量损失率较小. 与相

应冻融前混凝土相比,25、75 和 125 次冻融循环后,普通混凝土动弹性模量损失率分别为 4.2%、19%和 32.3%,掺沙漠砂混凝土动弹性模量损失率分别为 2.3%、17.6%和 27.9%. 由于混凝土中孔隙水结冰后体积会产生膨胀,未结冰水和溶液发生迁移引起各种压力,使混凝土内部产生了损伤,经过反复冻融循环,混凝土内部损伤开始累积加剧^[11-12]. 混凝土中掺入沙漠砂,有效填充了混凝土粗、细骨料之间孔隙,减小了混凝土中水的含量. 在相同冻融循环次数下,掺沙漠砂混凝土由于水结冰产生体积膨胀导致的损伤小于普通混凝土,故掺沙漠砂混凝土动弹性模量损失率小于普通混凝土.

2.4 超声波波速损失率

采用 DJUS-05 非金属超声综合检测仪,对不同冻融循环次数下混凝土超声波波速进行检测. 超声

波波速损失率为冻融前、后测得超声波波速之差与冻融前测得超声波波速的比值. 图 7 为超声波波速损失率与冻融循环次数关系. 两组混凝土超声波波速损失率随着冻融循环次数的增加而逐渐增大,掺沙漠砂混凝土超声波波速损失率较小. 与相应冻融前混凝土相比,25、75 和 125 次冻融循环后,普通混凝土超声波波速损失率分别为 5.8%、11.9%和 21.8%,掺沙漠砂混凝土超声波波速损失率分别为 3.5%、8.4%和 21.3%,这主要是由于正负温度使得混凝土内部产生新的孔洞、裂纹等微缺陷,经过正负温度反复交替作用,试件的孔洞、裂纹、剥落等缺陷更加明显^[13]. 沙漠砂的掺入有效减小了混凝土孔隙率,使混凝土内部更加密实. 在相同冻融循环次数下,与普通混凝土相比,掺沙漠砂混凝土内部损伤较小,所以掺沙漠砂混凝土超声波波速损失率小于普通混凝土.

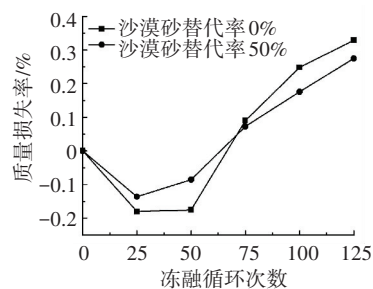


图 5 质量损失率与冻融循环次数关系

Fig.5 Relation between mass loss rate and the number of freeze-thaw cycles

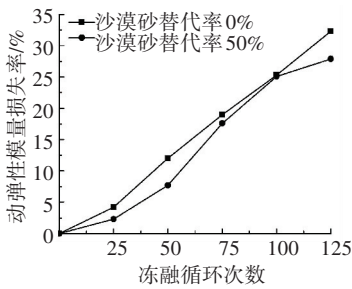


图 6 动弹性模量损失率与冻融循环次数关系

Fig.6 Relation between dynamic elastic modulus loss rate and the number of freeze-thaw cycles

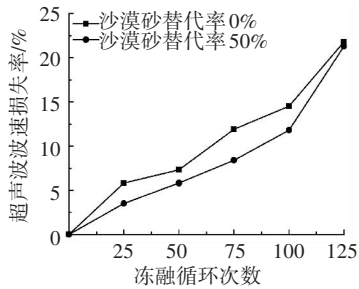


图 7 超声波波速损失率与冻融循环次数关系

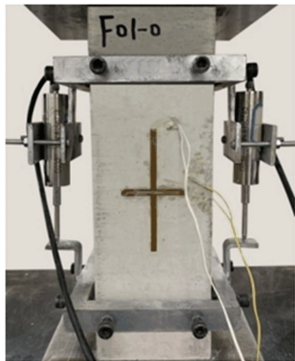
Fig.7 Relation between ultrasonic wave velocity loss rate and the number of freeze-thaw cycles

3 冻融后混凝土轴心抗压强度

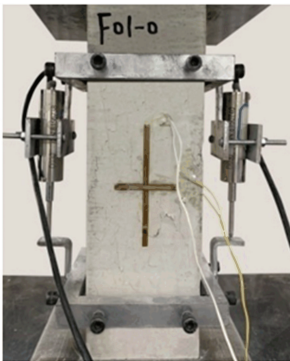
3.1 试验破坏形态

普通混凝土轴心抗压强度试验破坏过程如图 8 所示. 由图 8 可知,在加载初期,混凝土试件表面无可见裂缝;加载至 $0.8f_c \sim 0.9f_c$ 时,试件中部开始出现细微的竖向裂缝,随着荷载增大,裂缝逐渐增多,试件中

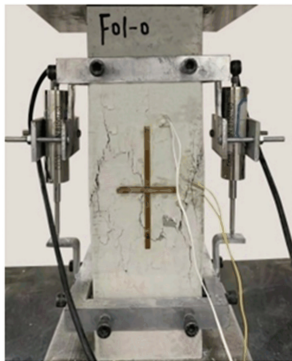
部逐渐横向膨胀;荷载达到峰值后,裂缝迅速扩展、增多. 图 9 为冻融前后普通混凝土与掺沙漠砂混凝土轴心受压破坏后形态. 由图 9 可知,随着冻融循环次数增加,试件表面裂缝逐渐增多,破坏形态趋于严重. 在相同冻融循环次数下,与普通混凝土相比,掺沙漠砂混凝土塑性变形大,破坏过程较缓慢.



(a) 加载初期



(b) 加载至 $0.8f_c \sim 0.9f_c$



(c) 峰值荷载后

图 8 普通混凝土轴心受压破坏过程

Fig.8 Failure process of ordinary concrete under axial compression

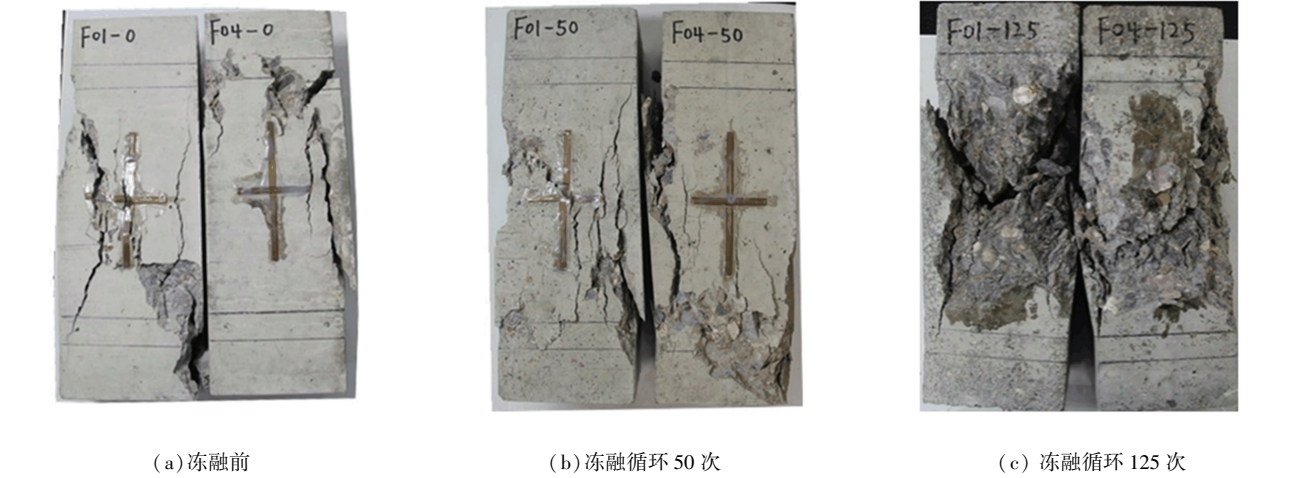


图9 冻融前后普通混凝土与掺沙漠砂混凝土轴心受压破坏图

Fig.9 Failure photos of desert sand concrete and ordinary concrete under axial compression before and after freeze-thaw cycles

3.2 应力-应变曲线及分析

表3为冻融前后普通混凝土与掺沙漠砂混凝土抗压强度测试结果. 由表3可知,随着冻融循环次数增加,普通混凝土与掺沙漠砂混凝土抗压强度逐渐减小. 在相同冻融循环次数下,掺沙漠砂混凝土抗压强度高于普通混凝土抗压强度.

表3 冻融前后混凝土单轴抗压强度

Tab.3 Uniaxial compressive strength of concrete before and after freeze-thaw cycles

编号	不同冻融循环次数下混凝土抗压强度/MPa					
	0次	25次	50次	75次	100次	125次
F01	37.2	36.5	34.3	32.1	30.1	27.7
F04	38.4	38.1	36.9	34.8	33.0	29.8

图10为冻融前后普通混凝土与掺沙漠砂混凝土应力-应变曲线. 由图10可知,随着冻融循环次数增加,上升段曲线斜率减小,峰值应力下降迅速,曲线趋于扁平.

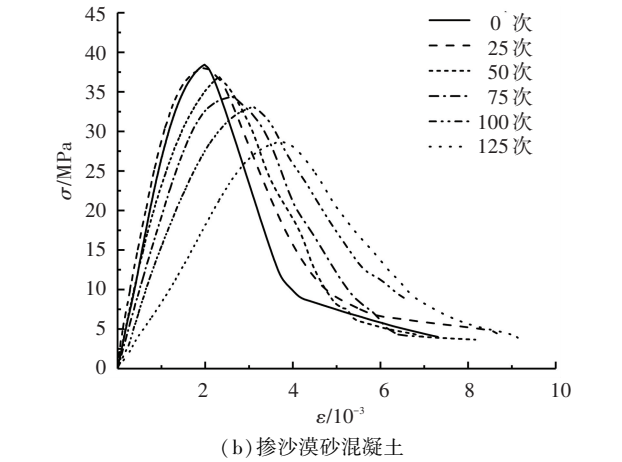
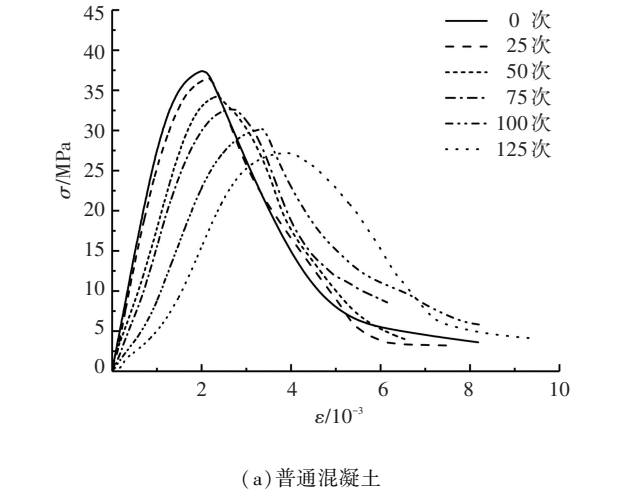


图10 冻融前后应力应变关系

Fig.10 Relation between strain and stress before and after freeze-thaw cycles

图11为冻融前后普通混凝土与掺沙漠砂混凝土应力-应变曲线比较. 由图11可知,随着冻融循环次数增加,加载初期上升段应力-应变曲线逐渐呈现下凹形状;在相同冻融循环次数下,普通混凝土加载初期曲线下凹与沙漠砂混凝土相比更明显,这主要是由于与普通混凝土相比,掺沙漠砂混凝土更加密实,经多次冻融循环后损伤较小,使得加载初期曲线下凹趋势不明显.

3.2.1 相对峰值应力

图12为相对峰值应力与冻融循环次数关系. 两组混凝土相对峰值应力随着冻融循环次数的增加逐渐减小. 与相应冻融前混凝土相比,25、75和125次冻融循环后,普通混凝土相对峰值应力分别减小1.4%、13.7%和25.6%,掺沙漠砂混凝土分别减小0.8%、9.4%和22.3%. 在相同冻融循环次数下,掺沙漠砂混凝土相对峰值应力均高于普通混凝土,这主

要是由于细小的沙漠砂掺入混凝土后,使混凝土内部粗细骨料之间微小间隙填充更加均匀、密实,减小了混凝土中水的含量,同时沙漠砂中细小的颗粒被认为是一种矿物物质,在冻融循环过程中,这些矿物物质能够继续发生水化反应,提高了混凝土强度^[6,14-16]. 普通混凝土和掺沙漠砂混凝土相对峰值应力与冻融循环次数之间呈线性关系. 普通混凝土

土: $f_{cd}/f_{c0} = -0.0021N + 1.0198, R^2 = 0.9785$; 掺沙漠砂混凝土: $f_{sd}/f_{s0} = -0.0017N + 1.0261, R^2 = 0.9310$. 其中 f_{c0} 为冻融前普通混凝土轴心受压峰值应力, f_{cd} 为不同冻融循环次数下普通混凝土轴心受压峰值应力, f_{s0} 为冻融前掺沙漠砂混凝土轴心受压峰值应力, f_{sd} 为不同冻融循环次数下掺沙漠砂混凝土轴心受压峰值应力, N 表示冻融循环次数.

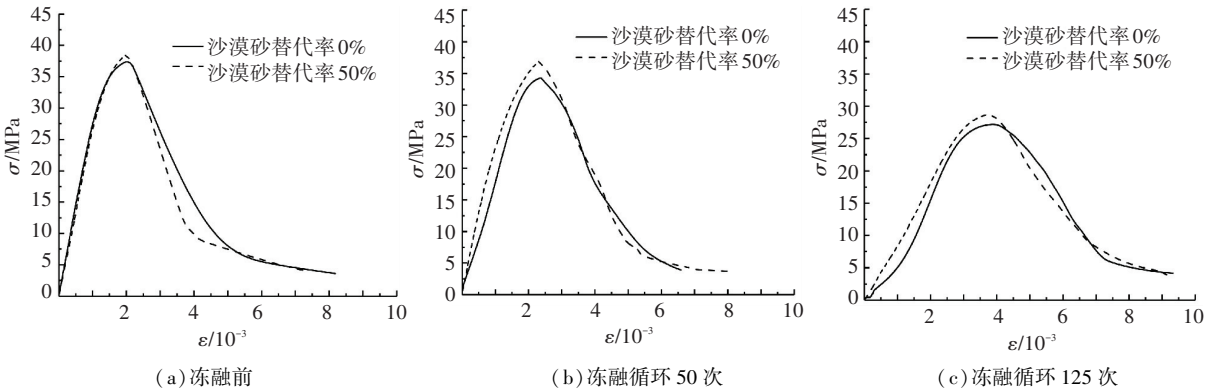


图 11 冻融前后混凝土应力-应变曲线比较

Fig.11 Comparison of stress-strain curves of concrete before and after freeze-thaw cycles

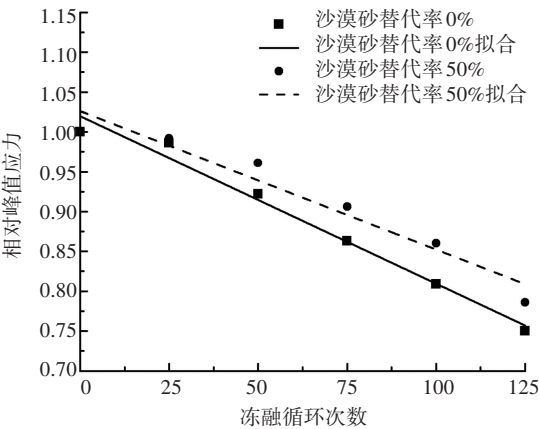


图 12 相对峰值应力与冻融循环次数关系

Fig.12 Relation between relative peak stress and the number of freeze-thaw cycles

3.2.2 相对峰值应变

图 13 为相对峰值应变与冻融循环次数之间关系. 随着冻融循环次数的增加,两组混凝土相对峰值应变逐渐增大. 与冻融前混凝土相比,25、75 和 125 次冻融循环后,普通混凝土相对峰值应变分别为 1.089、1.340 和 1.833,掺沙漠砂混凝土分别为 1.015、1.301 和 1.782. 在相同冻融循环次数下,掺沙漠砂混凝土相对峰值应变小于普通混凝土,这主要是由于沙漠砂有效地填充了混凝土粗、细骨料之间孔隙,形成坚固骨架,降低了混凝土可变形性. 普通混凝土和掺沙漠砂混凝土相对峰值应变与冻融循环次数之间呈线性关系. 普通混凝土: $\varepsilon_{cd}/\varepsilon_{c0} = 0.0070N + 0.9119, R^2 = 0.9255$; 掺沙漠砂混凝土:

$\varepsilon_{sd}/\varepsilon_{s0} = 0.0065N + 0.8970, R^2 = 0.9272$. 其中 ε_{c0} 表示冻融前普通混凝土轴心受压峰值应变, ε_{cd} 表示不同冻融循环次数下普通混凝土轴心受压峰值应变, ε_{s0} 为冻融前掺沙漠砂混凝土轴心受压峰值应变, ε_{sd} 为不同冻融循环次数下掺沙漠砂混凝土轴心受压峰值应变.

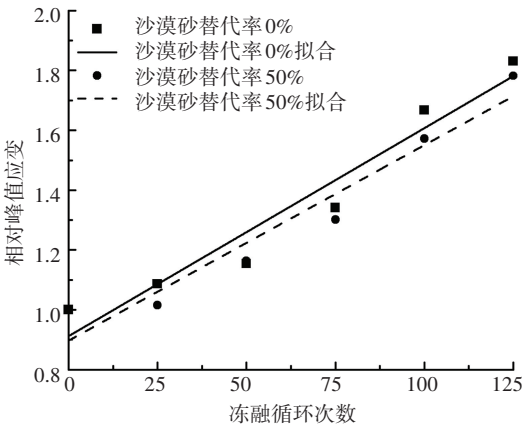


图 13 相对峰值应变与冻融循环次数关系

Fig.13 Relation between relative peak strain and the number of freeze-thaw cycles

3.2.3 极限应变

根据《混凝土结构设计规范》^[17], 极限应变取应力-应变曲线下降段 $0.5f_c$ 时所对应的压应变. 图 14 为普通混凝土和掺沙漠砂混凝土极限应变与冻融循环次数之间关系. 由图 14 可知,两组混凝土极限应变随着冻融循环次数增加逐渐增大. 25、75 和 125 次冻融循环后,普通混凝土极限应变分别是冻融前普通混凝土极限应变的 1.04、1.21 和 1.72 倍,

掺沙漠砂混凝土极限应变分别是冻融前掺沙漠砂混凝土极限应变的 1.14、1.41 和 1.87 倍, 掺沙漠砂混凝土相对极限应变高于普通混凝土, 这主要是由于沙漠砂有效地填充了混凝土粗、细骨料之间的孔隙, 随着冻融循环次数的增多, 掺沙漠砂混凝土内部损伤累积与普通混凝土相比较少, 从而使得掺沙漠砂混凝土破坏过程比较缓慢。

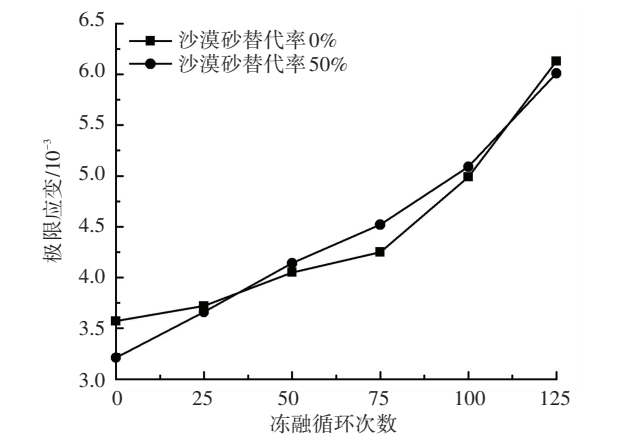


图 14 极限应变与冻融循环次数关系

Fig. 14 Relation between ultimate strain and the number of freeze-thaw cycles

3.2.4 弹性模量

混凝土弹性模量取应力-应变全曲线上上升段 $0.4f_c$ 处的割线模量。图 15 为普通混凝土和掺沙漠砂混凝土弹性模量与冻融循环次数关系。由图 15 可知, 随着冻融循环次数增加, 掺沙漠砂混凝土弹性模量先增加后减小, 普通混凝土弹性模量不断降低。在相同冻融循环次数下, 掺沙漠砂混凝土弹性模量明显大于普通混凝土弹性模量, 这主要是由于沙漠

砂中细小颗粒被认为是一种矿物质, 在冻融循环过程中, 这些矿物质能够继续发生水化反应, 提高了混凝土自身刚度^[6, 14-15]。

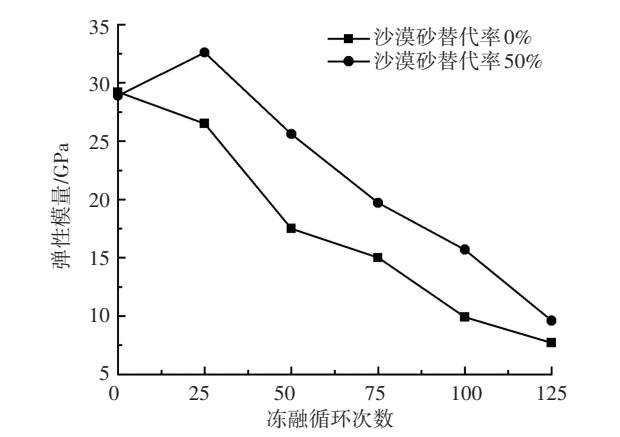


图 15 弹性模量与冻融循环次数关系

Fig. 15 Relation between elastic modulus and the number of freeze-thaw cycles

3.2.5 横向变形系数

混凝土横向变形系数是混凝土横向变形与纵向变形的比值, 是计算混凝土结构工程抗裂、变形的一个重要参数。图 16 和图 17 分别为冻融前后普通混凝土和掺沙漠砂混凝土荷载比^[18] λ 与横向变形系数关系曲线。由图 16 和图 17 可知, $\lambda < 0.6$ 时, 普通混凝土和掺沙漠砂混凝土轴向变形较大, 横向变形较小, 横向变形系数增长缓慢; $\lambda > 0.6$ 时, 普通混凝土和掺沙漠砂混凝土横向变形快速增大, 横向变形系数增长加快。

图 18 为荷载比 $\lambda = 0.4$ 时普通混凝土和掺沙漠砂混凝土横向变形系数与冻融循环次数的关系。

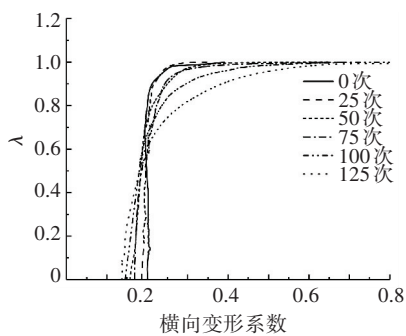


图 16 普通混凝土 λ 与横向变形系数关系

Fig. 16 Relation between λ of ordinary concrete and transverse deformation coefficient

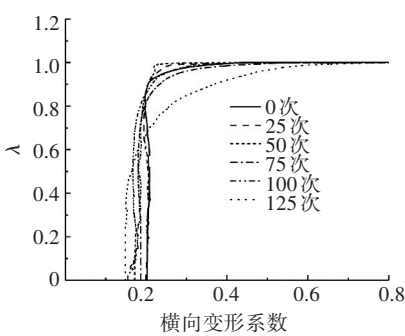


图 17 掺沙漠砂混凝土 λ 与横向变形系数关系

Fig. 17 Relation between λ of desert sand concrete and transverse deformation coefficient

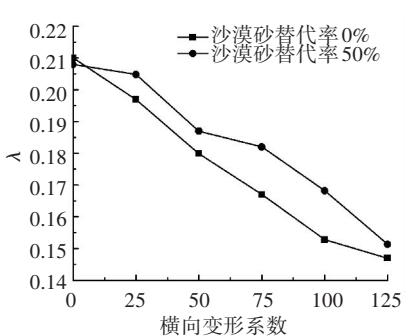


图 18 横向变形系数 ($\lambda=0.4$) 与冻融循环次数关系

Fig. 18 Relation between transverse deformation coefficient ($\lambda = 0.4$) and the number of freeze-thaw cycles

由图 18 可知, 两组试件的横向变形系数随着冻融循环次数的增加逐渐减小。与相应冻融前混凝土相比, 25、75 和 125 次冻融循环后, 普通混凝土横向

变形系数分别减小了 6%、26% 和 43%, 掺沙漠砂混凝土分别减小了 2%、14% 和 37%。由此可知, 掺沙漠砂混凝土横向变形系数减小率低于普通混凝土,

这主要是由于随着冻融循环次数增加,掺沙漠砂混凝土内部损伤较小,使得掺沙漠砂混凝土塑性变形较好.

3.3 本构模型

目前,国内外学者对常温下混凝土单向受压时应力-应变关系的数学模型研究较多,主要有Sargin^[19]、Hogenestad^[20]、过镇海^[21]等模型. 由于各种因素影响,混凝土应力-应变全曲线下降段不太理想. 过镇海提出的本构模型参数少、形式简单、计算方便,能把上升段与下降段的参数区分开,上升段: $y = Ax + (3 - 2A)x^2 + (A - 2)x^3, 0 < x < 1$;下降段: $y = x[a(x - 1)^2 + x]^{-1}, x > 1$,其中 $x(x = \varepsilon/\varepsilon_0)$ 为相对应变, $y(y = \sigma/f_c)$ 为相对应力, f_c 和 ε_0

分别为峰值应力和峰值应变.

图 19 为冻融前后普通混凝土与掺沙漠砂混凝土应力-应变曲线拟合. 由图 19 可知,上升段吻合程度很好,下降段由于各种因素影响曲线拟合程度稍差. 表 4 为冻融前后混凝土应力-应变曲线的控制参数值. 由表 4 可知,不论是普通混凝土,还是掺沙漠砂混凝土,拟合曲线上升段控制参数 A 值随着冻融循环次数增加而逐渐降低,拟合曲线下降段控制参数 a 随着冻融循环次数增加逐渐增加. 在相同冻融循环次数下,掺沙漠砂混凝土拟合曲线上上升段控制参数 A 值高于普通混凝土,拟合曲线下降段控制参数 a 低于普通混凝土.

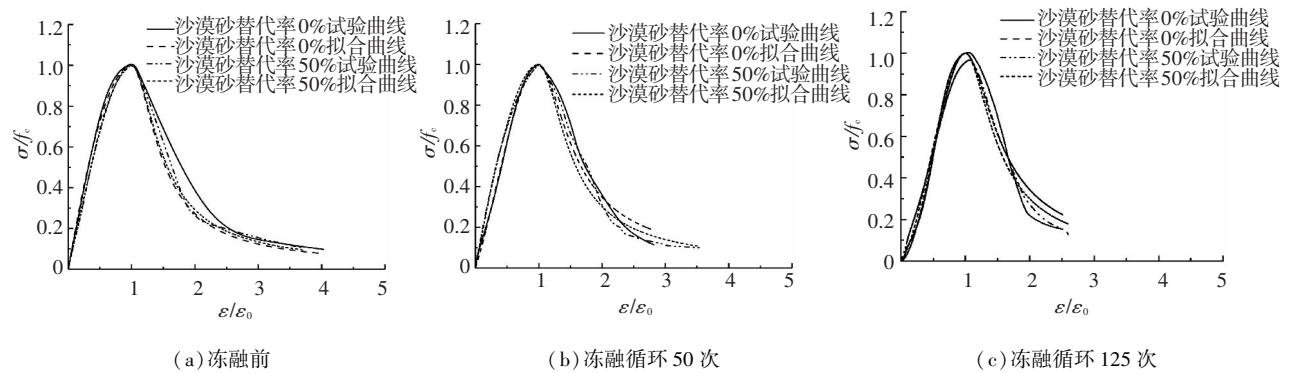


图 19 冻融前后混凝土应力-应变曲线拟合

Fig.19 Fitting of stress-strain curves of concrete before and after freeze-thaw cycles

表 4 混凝土应力-应变曲线控制参数 A 与 a

Tab.4 Control parameters A and a of stress-strain curves of concrete

冻融循环次数	控制参数				相关系数 R^2			
	A		a		A		a	
	F01	F04	F01	F04	F01	F04	F01	F04
0 次	1.810 0	1.790 0	3.350 0	2.860 0	0.997 4	0.998 1	0.938 1	0.970 5
25 次	1.810 0	1.840 0	3.370 0	2.120 0	0.996 2	0.998 8	0.907 1	0.986 2
50 次	1.120 0	1.600 0	3.580 0	3.650 0	0.988 4	0.981 9	0.979 5	0.977 1
75 次	1.270 0	1.520 0	4.220 0	3.520 0	0.990 2	0.992 1	0.980 5	0.964 2
100 次	0.800 0	1.490 0	3.840 0	3.740 0	0.994 1	0.989 3	0.961 3	0.963 1
125 次	0.250 0	0.400 0	3.840 0	3.810 0	0.971 3	0.979 4	0.958 8	0.967 9

3.4 动弹性模量与峰值应力关系

图 20 为不同冻融循环作用下普通混凝土和掺沙漠砂混凝土动弹性模量与峰值应力之间关系. 随着动弹性模量的增大,两组混凝土峰值应力逐渐增加,峰值应力与动弹性模量之间呈线性关系. 普通混凝土: $f_c = 0.776\ 2E_d + 6.731\ 9, R^2 = 0.982\ 1$;掺沙漠砂混凝土: $f_c = 0.683\ 9E_d + 11.434\ 7, R^2 = 0.908\ 2$.

3.5 超声波波速与峰值应力关系

图 21 为不同冻融循环作用下普通混凝土和掺沙漠砂混凝土超声波波速与峰值应力之间关系. 随着超声波波速的增大,两组混凝土峰值应力逐渐增加. 两组混凝土峰值应力与超声波波速之间有良好的线性相关性. 普通混凝土: $f_c = 14.579\ 5v - 12.143\ 1, R^2 = 0.949\ 9$;掺沙漠砂混凝土: $f_c =$

$$12.452\ 9v - 4.263\ 5, R^2 = 0.973\ 5.$$

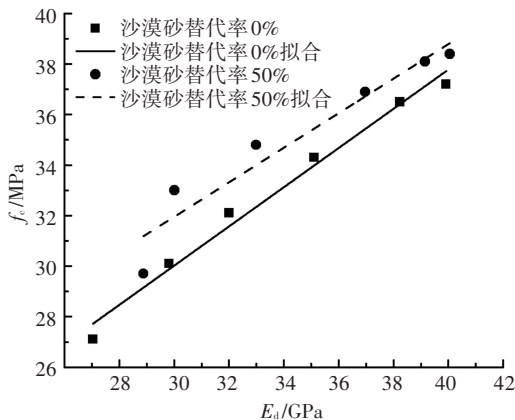


图 20 动弹性模量与峰值应力关系

Fig.20 Relation between dynamic elastic modulus and peak stress

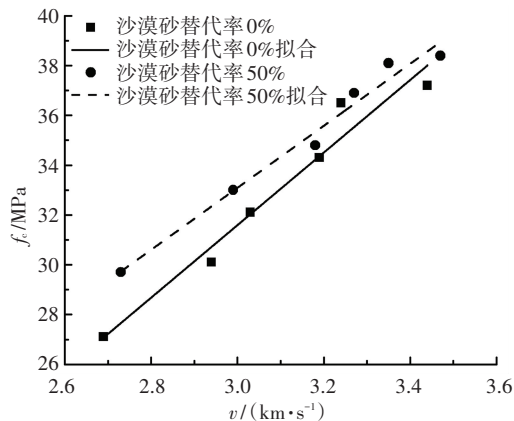


图 21 超声波波速与峰值应力关系

Fig.21 Relation between ultrasonic wave velocity and peak stress

4 结 论

- 1)进行了冻融后沙漠砂混凝土轴心抗压强度试验,研究了沙漠砂对混凝土抗冻性能的影响,探究了在不同冻融循环次数下沙漠砂混凝土表面特征、质量损失率、动弹性模量损失率及超声波波速损失率的变化规律,建立了不同冻融循环次数下沙漠砂混凝土轴心受压应力-应变曲线方程。
- 2)随着冻融循环次数增多,掺沙漠砂混凝土表面剥落越严重,质量损失率变化较小,动弹性模量损失率和超声波波速损失率均增大;掺沙漠砂混凝土轴心受压破坏特征愈加明显,轴心受压应力-应变曲线趋于扁平,弹性模量、相对峰值应力和横向变形系数均减小,相对峰值应变和极限应变均增加;掺沙漠砂混凝土拟合曲线上升段控制参数 A 值逐渐降低,下降段控制参数 a 逐渐增加。
- 3)在相同冻融循环次数下,掺沙漠砂混凝土动

弹性模量损失率和超声波波速损失率均小于普通混凝土;掺沙漠砂混凝土相对峰值应变小于普通混凝土,相对峰值应力、弹性模量和横向变形系数高于普通混凝土;掺沙漠砂混凝土拟合曲线上升段控制参数 A 值高于普通混凝土,下降段控制参数 a 低于普通混凝土。

参考文献

- [1] MEHTA P K. Durability of concrete-fifty years of progress[J]. ACI Special Publication, 1991, 126:1
- [2] 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
HONG Jinxiang, MIAO Changwen, LIU Jiaping, et al. Law of mechanical properties attenuation of freeze-thaw damaged concrete [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2): 173
- [3] BOGAS J A, BRITO J D, RAMOS D. Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 115:294
- [4] 曹大富, 富立志, 杨忠伟, 等. 冻融循环作用下混凝土受压本构特征研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 17
CAO Dafu, FU Lizhi, YANG Zhongwei, et al. Study on compressive constitutive characteristics of concrete under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 17
- [5] 龙广成, 杨振雄, 白朝能, 等. 荷载-冻融耦合作用下充填层自密实混凝土的耐久性及其损伤模型[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(7): 855
LONG Guangcheng, YANG Zhenxiong, BAI Chaoneng, et al. Durability and damage model of self-compacting concrete with filling layer under load-freezing-thawing interaction[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(7): 855
- [6] LUO F J, HE L, PAN Z, et al. Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 131
- [7] JIN Baohong, SONG Jianxia, LIU Haifeng. Engineering characteristics of concrete made of desert sand from Maowusu sandy land[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 174-177: 604
- [8] LIU Haifeng, MA Jurong, WANG Yiyi, et al. Influence of desert sand on the mechanical properties of concrete subjected to impact loading[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2017, 30(6): 583
- [9] 刘宁, 刘海峰, 刘利明. 高温对沙漠砂高强混凝土抗压强度影响[J]. 混凝土, 2017(6): 28
LIU Ning, LIU Haifeng, LIU Liming. Effect of high temperature on compressive strength of desert sand high strength concrete [J]. Concrete, 2017(6): 28
- [10] 中国建筑科学研究院. 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
China Academy of Building Research. Standard test method for long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009
- [11] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete[J]. ACI Journal, 1945, 16(4): 245
- [12] POWERS T C. Freezing effects in concrete, durability of concrete [M]. Detroit: American Concrete Institute, 1975