

文章编号:1672-3961(2025)05-0130-10

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.227

盐溶液干湿循环作用下钢渣细骨料混凝土的耐久性

薛刚,邱永康*,秦政博,董伟

(内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘要:为研究盐溶液干湿循环作用下钢渣细骨料混凝土(steel slag fine aggregate concrete, SSC)的耐久性,通过力学性能试验确定钢渣和粉煤灰在混凝土中的最佳体积分数,并对混凝土试样进行盐溶液干湿耐久性试验,综合考虑钢渣、粉煤灰体积分数对混凝土的外观、质量、动弹性模量及抗压强度的影响。结果表明:钢渣体积分数为30%时,SSC的抗压强度、抗折强度、动弹性模量均优于普通混凝土;继续掺入10%体积分数的粉煤灰后,SSC各项力学性能指标进一步提高;100次盐溶液干湿循环后,钢渣体积分数为30%的SSC质量损失率、抗压强度损失率、动弹性模量损失率均小于普通混凝土,继续掺入10%体积分数的粉煤灰可延缓SSC耐久性劣化,且SSC在单盐溶液干湿循环作用的耐久性好于复盐溶液;以动弹性模量损伤为指标建立了损伤演化方程,可较好地描述盐溶液干湿循环作用下SSC性能的劣化过程。

关键词:钢渣细骨料混凝土;盐蚀;干湿循环;耐久性;损伤演化

中图分类号:TU528.51 文献标志码:A

引用格式:薛刚,邱永康,秦政博,等. 盐溶液干湿循环作用下钢渣细骨料混凝土的耐久性[J]. 山东大学学报(工学版),2025,55(5):130-139.

XUE Gang, QIU Yongkang, QIN Zhengbo, et al. Durability of steel slag fine aggregate concrete under the action of salt solution wet and dry circulation[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(5):130-139.

Durability of steel slag fine aggregate concrete under the action of salt solution wet and dry circulation

XUE Gang, QIU Yongkang*, QIN Zhengbo, DONG Wei

(College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to study the durability of steel slag fine aggregate concrete (SSC) under the action of dry-wet cycle of salt solution, the optimal volume fraction of steel slag and fly ash in concrete was determined by mechanical property tests, and the dry and wet durability test of salt solution was carried out on concrete samples. The effects of the volume fraction of steel slag and fly ash on the appearance, quality, dynamic elastic modulus, and compressive strength of concrete were considered comprehensively. The results showed that when the volume fraction of steel slag was 30%, the compressive strength, flexural strength, and dynamic elastic modulus of SSC were better than those of ordinary concrete. The mechanical properties of SSC were further improved after 10% volume fraction of fly ash was added. After 100 dry-wet cycles of salt solution, the mass loss rate, compressive strength loss rate, and dynamic elastic modulus loss rate of steel slag with 30% volume fraction were smaller than those of ordinary concrete. The addition of 10% volume fraction fly ash could delay the deterioration of SSC durability, and the durability of SSC in dry and wet cycling of single salt solution was better than that of double salt solution. The damage evolution equation was established with the dynamic elastic modulus damage as the index, which could describe the deterioration of SSC properties under the dry-wet cycle of salt solution.

Keywords: steel slag fine aggregate concrete; salt corrosion; dry-wet cycle; durability; damage evolution

收稿日期:2024-09-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52168032);2023年度内蒙古自治区直属高校基本科研业务费资助项目(2023RCTD025)

第一作者简介:薛刚(1968—),男,内蒙古包头人,教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为新型建筑材料。E-mail: xuegang-2008@126.com

*通信作者简介:邱永康(2000—),男,福建光泽人,硕士研究生,主要研究方向为新型建筑材料。E-mail:17346204687@163.com

0 引言

近年来,我国粗钢年产量已超过10亿t,产生的钢渣约占粗钢产量的15%~20%^[1-2],钢渣的综合利用率相比欧美等国存在较大差距^[3]。钢渣高效利用可减少对土地资源的占用,避免对大气和地下水资源造成污染。钢渣密度大、硬度高并具有水硬活性,可作为骨料和掺合料制备混凝土,实现资源化利用与环境保护双赢。

盐渍环境和干湿条件对混凝土性能影响显著,在其作用下混凝土劣化速度加快^[4-5]。我国盐渍土分布较为广泛,盐渍土地表水和地下水含有一定量腐蚀性盐离子,能够对混凝土结构造成破坏。国内外学者对盐渍环境下混凝土的耐久性进行了大量研究,文献[6-7]表明,掺入粉煤灰可以提高混凝土的抗盐腐蚀性能;文献[8]发现,掺入粉煤灰可以延缓氯离子侵入,提升混凝土耐久性;文献[9]利用钢渣代替混凝土中的粗骨料,发现混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能明显提高。实际工程中,混凝土结构很少在单一盐环境下工作,常处于多种盐溶液共同侵蚀的环境中,文献[10]发现,与单一盐侵蚀相比,复合盐侵蚀下硫酸盐和氯盐的侵蚀产物均减少。混凝土除了受到各种盐类的侵蚀外,还经常同时受到干湿交替、荷载等多种因素的影响,文献[11]表明,随着干湿循环次数的增加,混凝土的断裂韧性降低;文献[12]发现氯盐干湿循环会降低混凝土抗渗性,增大临界孔径;文献[13]发现在硫酸盐干湿循环作用下,混凝土的孔隙体积明显增大,微孔、微裂缝的产生和扩展对混凝土性能的劣化有重要影响;文献[14-15]研究了风积沙混凝土在硫酸盐干湿循环作用下的性能劣化规律,结果表明,随着循环次数的增加混凝土内部孔隙变大,试件的抗压耐蚀系数降低。

综上所述,钢渣和粉煤灰对混凝土耐久性能均有一定的影响,盐渍环境和干湿条件对混凝土耐久性能也有显著影响。钢渣成分具有地域性特点,不同地域钢渣的成分和活性均不尽相同^[16],对混凝土耐久性的影响规律也存在差异。内蒙古钢

渣产生量较多,为系统了解本地区钢渣细骨料混凝土在盐侵与干湿状态下的耐久性,本研究选取包头某钢铁企业钢渣加工成细骨料,等体积取代天然砂制备钢渣细骨料混凝土,分别考虑不同盐溶液(2.5% NaCl-2.5% Na₂SO₄、5% NaCl、5% Na₂SO₄)干湿循环作用,研究钢渣细骨料混凝土质量、动弹性模量、抗压强度的变化特点,并以动弹性模量建立损伤演化方程,揭示钢渣细骨料混凝土的损伤演化规律,以期提升内蒙古地区钢渣的资源化利用水平提供科学依据。

1 试验概况

1.1 原材料

本试验使用的原材料有:P·O42.5普通硅酸盐水泥;Ⅱ级粉煤灰;天然砂和碎石(来自包头本地),粒径分别为5~20mm、0~4.75mm;钢渣经过筛选后,粒径为0~4.75mm的连续级配,符合《建设用砂》(GB14684—2022)^[17]要求;聚羧酸高性能减水剂,减水率为26%,最佳体积分数为0.2%~1.0%。细骨料级配曲线如图1所示。图1中S为累计筛余量百分数,d为孔径。水泥、钢渣、粉煤灰的主要化学成分质量分数见表1。粗、细骨料物理性能见表2。

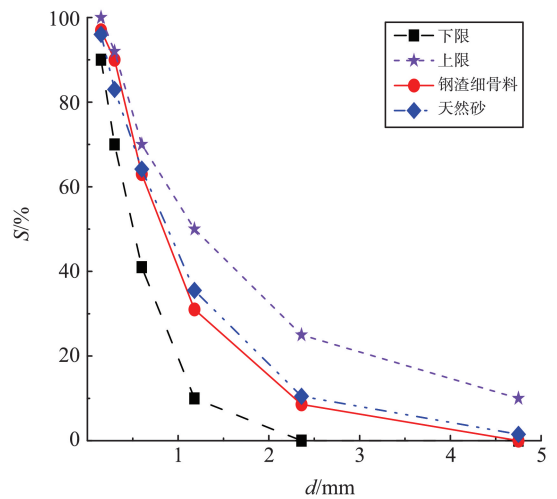


图1 细骨料级配曲线

Fig.1 Fine aggregate grading curve

表1 水泥、钢渣和粉煤灰的主要化学成分质量分数

Table 1 The mass fractions of the main chemical components in cement, steel slag, and fly ash

原材料	质量分数/%						
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	烧失量	其他
水泥	60.90	24.98	6.42	3.56	2.42		0.56
钢渣	42.30	15.20	5.30	22.90	7.50		12.80
粉煤灰	6.12	51.82	25.65	5.20	2.40	3.94	4.87

表2 骨料物理性能指标

Table 2 Physical properties of aggregates

骨料	表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	细度 模数	松散堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	吸水率/ %	含水率/ %
砂	2 601	2.87	1 566	0.90	0.50
碎石	2 681		1 450	0.80	0.50
钢渣	3 440	2.94	1 800	3.70	0.25

1.2 钢渣安定性测试

参照《水泥压蒸安定性试验方法》(GB/T750—1992)^[18]分别制作不同钢渣体积分数下尺寸为25 mm×25 mm×280 mm的砂浆棒试件,测试钢渣安定性。

不同钢渣体积分数下砂浆棒的膨胀率如图2所示。由图2可见,随着钢渣体积分数从10%增加到30%,砂浆棒的膨胀率呈现小幅度增长,但均满足规范的限值要求;钢渣体积分数为50%时,砂浆棒的膨胀率超出规范要求,并且压蒸后试件出现开裂甚至掉角,安定性显著下降,故钢渣体积分数不应高于50%。

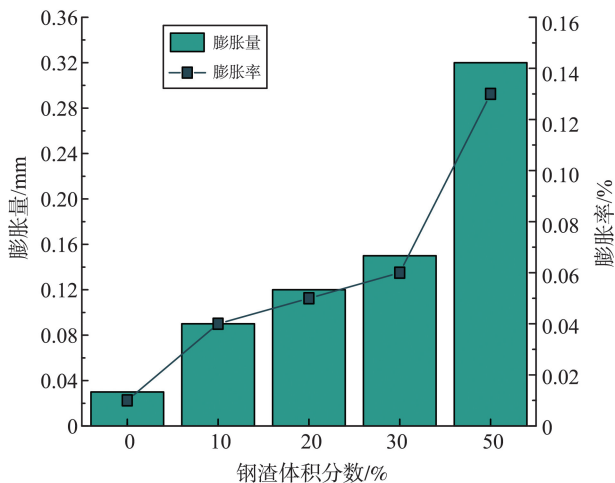


图2 砂浆棒的安定性试验结果

Fig.2 Stability test results of mortar bar

1.3 配合比设计

依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2011)^[19]确定钢渣细骨料混凝土配合比,设计强度等级为C50,水胶比为0.4,钢渣以15%、30%、45%等

体积替代天然砂,研究钢渣体积分数对混凝土力学性能的影响并由此确定最佳体积分数。确定钢渣最佳体积分数为30%后,在此基础上分别用粉煤灰等体积替代混凝土中10%、20%的水泥,研究粉煤灰对钢渣细骨料混凝土力学性能的影响,并系统研究盐溶液干湿循环作用下钢渣细骨料混凝土的耐久性。钢渣细骨料混凝土配合比如表3所示。表3中C0代表普通混凝土;SSC代表钢渣细骨料混凝土,其后缀数字为钢渣体积分数;SSCF代表最佳钢渣体积分数(30%)并掺加粉煤灰的混凝土试样,后缀数字为粉煤灰体积分数。每 m^3 试件中碎石、水、减水剂的质量分别为1 040、180、1.0 kg。

表3 钢渣细骨料混凝土配合比

Table 3 Mix ratio of steel slag fine aggregate concrete

试验编号	每 m^3 试件中的质量/kg			
	水泥	粉煤灰	砂	钢渣
C0	450	0	760	0
SSC15	450	0	646	114
SSC30	450	0	532	228
SSC45	450	0	418	342
SSCF10	405	45	532	228
SSCF20	360	90	532	228

1.4 试验方法

本研究立方体试块尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,用于测试抗压强度;棱柱体试块尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,用于测试抗折强度、动弹性模量和质量。试件标准养护28 d后,进行力学性能和耐久性能试验。测定试样在不同盐溶液(5% NaCl溶液、5% Na_2SO_4 溶液、2.5% NaCl-2.5% Na_2SO_4 溶液)和干湿循环(0、20、40、60、80、100次)作用下的抗压强度、动弹性模量及质量。为了对不同盐溶液进行对比分析,复合盐溶液总质量分数设置为5%,其中两种单盐质量分数设置为总质量分数的1/2,即2.5%。试验方案如表4所示,每个盐溶液干湿循环的流程为:盐溶液浸泡16 h→80℃烘干6 h→室温冷却2 h,共100次干湿循环,每20次干湿循环为一个周期。

表4 试验方案

Table 4 Test plan

序号	试件编号	试验名称	试验概要	试验目的
1	C0、SSC15、SSC30、SSC45	力学试验	考虑4种钢渣体积分数,通过力学试验确定最佳钢渣体积分数	确定最佳钢渣体积分数(SSC30)
2	SSC30、SSCF10、SSCF20	力学试验	在最佳钢渣体积分数基础上,再分别掺入10%、20%体积分数的粉煤灰,其中SSC30为基准组,无粉煤灰添加。共3组试样,通过力学试验确定最佳粉煤灰体积分数	确定最佳粉煤灰体积分数(SSCF10)

表4(续)

序号	试件编号	试验名称	试验概要	试验目的
3	C0、SSC15、SSC30、SSC45、SSCF10、SSCF20	复盐-干湿耐久性试验	4种钢渣体积分数,及钢渣体积分数为30%且掺10%、20%体积分数的粉煤灰2组,共6组试样开展复盐-干湿耐久性试验	研究钢渣及粉煤灰体积分数对复盐-干湿耐久性的影响
4	C0、SSC30、SSCF10	单盐-干湿耐久性试验	2对照组(C0、SSC30)、30%体积分数的钢渣且掺10%体积分数的粉煤灰1组(SSCF10),共3组试样,开展单盐-干湿耐久性试验	对典型试件进行单盐-干湿耐久性试验,与复盐情况对比分析

2 试验结果分析

2.1 力学性能

混凝土28d抗压、抗折以及动弹性模量试验结果如图3所示。图3中 f_c 为抗压强度, f_{ct} 为抗折强度, E 为动弹性模量。由图3可见,随着钢渣体积分数的增加,混凝土的 f_c 、 f_{ct} 、 E 均呈现先增加后减小的趋势,钢渣体积分数为30%时均达到最大值,SSC30组试样的 f_c 、 f_{ct} 、 E 相较C0组分别提高

0.73%、3.45%、8.69%,SSCF10组相比SSC30组分别提高4.35%、3.77%、0.78%,SSCF20组相比SSCF10组分别减少13.05%、2.94%、0.77%,表明掺入30%体积分数的钢渣,混凝土的力学性能均有一定提高,在此基础上再掺入10%体积分数的粉煤灰,对SSC力学性能也有一定提升作用,这是因为粉煤灰的火山灰效应,粉煤灰球形颗粒逐渐被针状钙矾石取代,针状钙矾石可以填充黏结剂基体的空隙,产生更致密的黏结剂基质^[20],使得混凝土内部结构更加致密,从而混凝土力学性能提高。

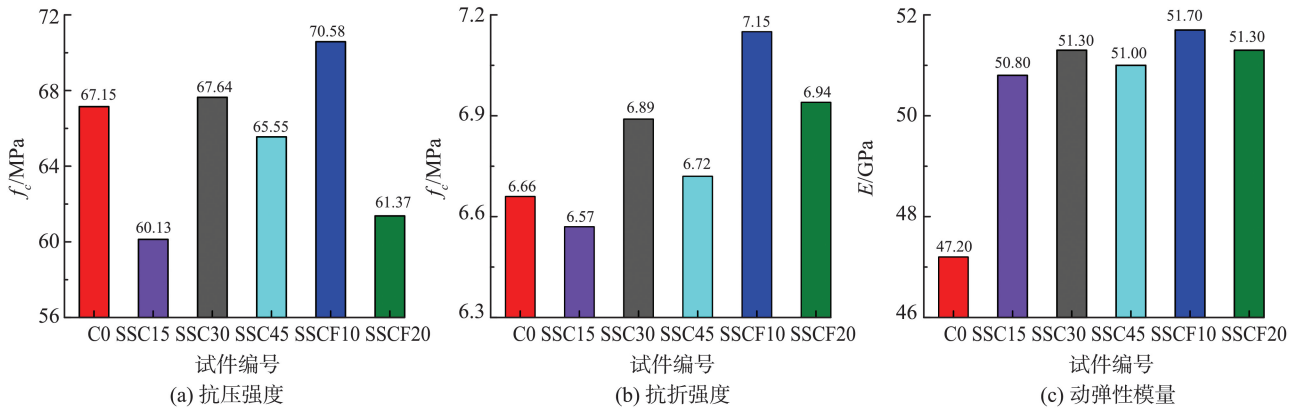


图3 混凝土的28d抗压、抗折强度及动弹性模量

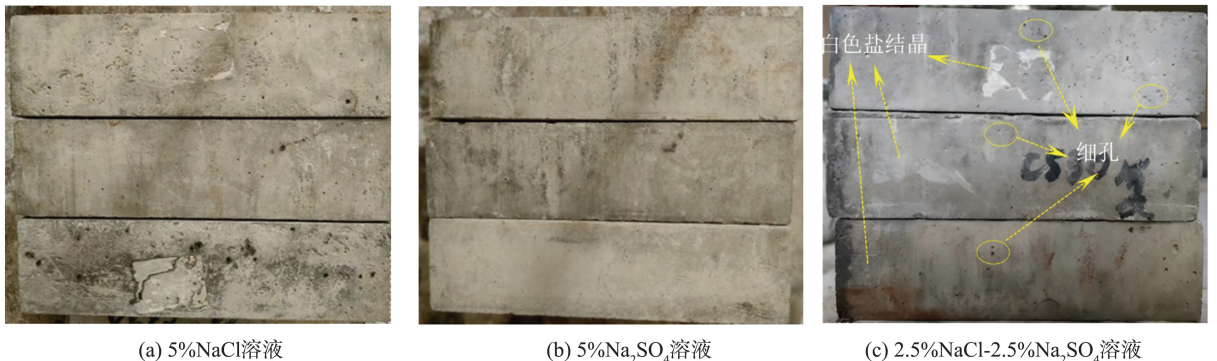
Fig.3 28 d compressive strength, flexural strength and dynamic elastic modulus of concrete

2.2 盐溶液干湿作用下钢渣细骨料混凝土损伤规律

2.2.1 表观形态

SSC30组试样100次干湿循环后的外观变化如

图4所示。可见SSC在盐溶液干湿循环作用下外观损伤变化不明显,复合盐溶液中混凝土表面出现比单盐相对明显的白色盐结晶、细孔增多现象,试样完整性较好。



(a) 5%NaCl溶液

(b) 5%Na₂SO₄溶液

(c) 2.5%NaCl-2.5%Na₂SO₄溶液

图4 SSC30试样100次干湿循环后的表观变化

Fig.4 Apparent changes of SSC30 test block after 100 dry and wet cycles

2.2.2 质量损失率

不同盐溶液干湿循环作用下试样质量损失率

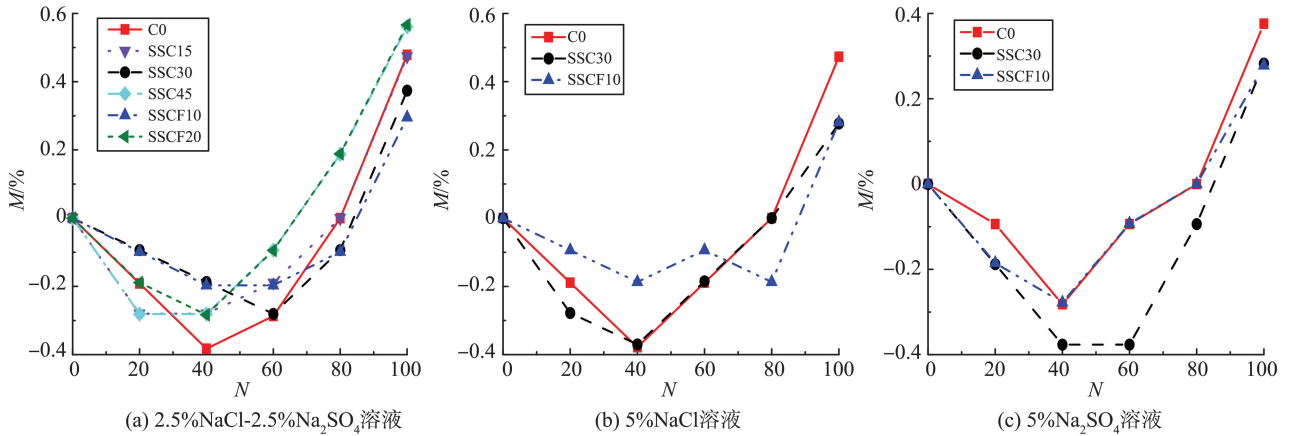


图5 不同盐溶液干湿循环作用下的质量损失率
Fig.5 Mass loss rate under different salt solution dry-wet cycles

由图5可知,各组试样的 M 均呈现先减小后上升的趋势。图5中前40次干湿循环为强化阶段,混凝土质量增加,这是因为混凝土内部水化产物与 SO_4^{2-} 反应生成石膏和钙矾石等物质,与 Cl^- 反应生成Friedel盐等物质,填充了混凝土的内部孔隙和微裂缝^[21-22],此时盐溶液侵蚀的负向作用小于填充的正向作用,导致混凝土的质量上升。40次干湿循环后为损伤阶段,混凝土质量开始下降,且下降速度越来越快,原因为:在过量盐侵产物产生的膨胀应力和干湿交替下形成的结晶压力的交互作用下,混凝土内部不断产生新裂缝,为盐离子侵入提供了更多新的通道^[23],此时盐溶液侵蚀的负向作用大于其填充的正向作用,使得混凝土质量下降,其 M 逐渐上升。

由图5(a)可知,在复合盐溶液中,100次干湿循环后, M 从小到大的试样依次为SSCF10、SSC30、SSC15、C0、SSC45、SSCF20,说明掺入30%体积分数的钢渣和10%体积分数的粉煤灰可以有效地抵抗盐侵及干湿循环耦合作用下混凝土的质量损失。

如图5所示,图5中 M 为质量损失率, N 为干湿循环次数。

对比图5(a)~(c)发现,100次干湿循环后,C0、SSC30、SSCF10三组试样的 M 从大到小依次变化。究其原因,相较于天然砂,钢渣表面粗糙且附着有绒毛状涂层及高吸水率^[24],显著改善了混凝土的界面过渡区和孔结构分布,同时,钢渣中的 SiO_2 和 $f-CaO$ 发生水化反应生成C-S-H等胶凝物质^[25],填充了混凝土中的裂缝和孔隙,抵抗了盐离子侵蚀。掺入适量粉煤灰后,其自身的火山灰效应可以提高水化反应速率,使水化产物AFt、 $Ca(OH)_2$ 增多,填充了胶凝孔隙,并降低裂缝生成,从而优化混凝土内部孔隙结构^[26-27],进一步降低盐离子侵蚀速度。经过100次干湿循环后,复合盐溶液中C0、SSC30、SSCF10三组试样的 M 均高于单盐溶液,表明复合盐溶液干湿循环作用下钢渣细骨料混凝土的质量损失更为严重。

2.2.3 相对动弹性模量

不同盐溶液干湿循环作用下试样的相对动弹性模量如图6所示。图6中 E_d 为相对动弹性模量。

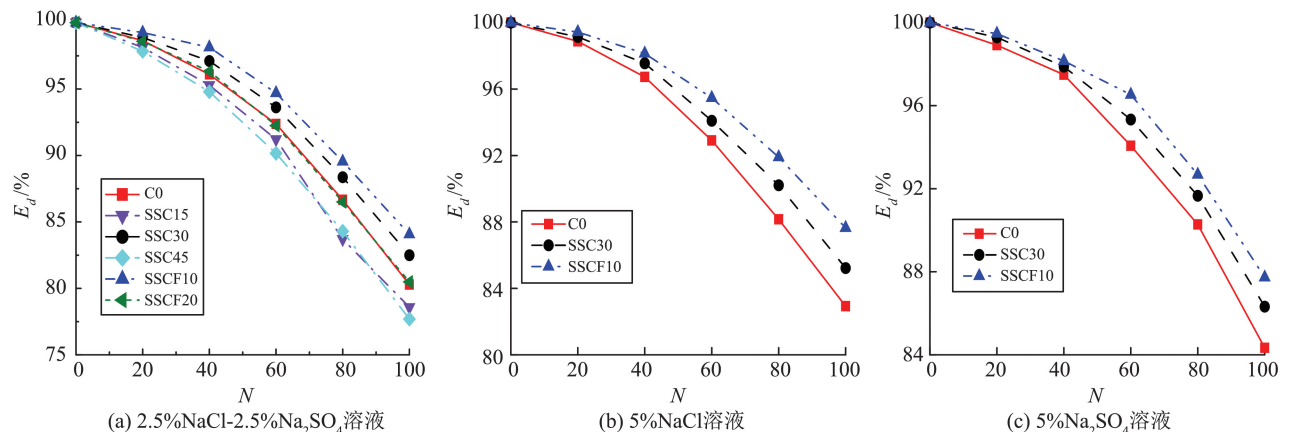


图6 不同盐溶液干湿作用下的相对动弹性模量
Fig.6 The relative dynamic elastic modulus of different salt solutions under dry-wet coupling

由图6可知,各组试样 E_d 随着干湿循环的进行逐渐减小,图6中前40次干湿循环为缓慢下降阶段,此时盐侵产物填充了混凝土的内部孔隙和微裂缝,盐离子侵蚀速度较慢,所以 E_d 损失较慢。40次干湿循环后为快速损伤阶段,归因于膨胀应力和结晶压力的交互作用,混凝土新裂缝不断产生,旧裂缝不断扩展,盐离子侵蚀速度不断加快,从而使动弹性模量损失逐渐加快。

由图6(a)可知,100次复合盐干湿循环后,动弹性模量损失率从小到大的试样依次为 SSCF10、SSC30、C0、SSCF20、SSC15、SSC45,说明掺入30%体积分数的钢渣和10%体积分数的粉煤灰可有效抵御混凝土在盐侵和干湿耦合作用下的动弹性模量损失。对比图6(a)~(c)发现,不同盐溶液中C0、SSC30、SSCF10三组试样在整个干湿循环周期,其动弹性模量损失率从大到小依次变化,原因为:与天然砂相比,钢渣的粗糙多孔和水化活性提高了混凝土密实度,延缓了盐离子侵蚀。在此基础上掺

入适量粉煤灰,进一步提高了混凝土致密度,更好地降低盐离子侵蚀速度。100次干湿循环后,复合盐溶液中C0、SSC30、SSCF10三组试样动弹性模量损失率均大于NaCl溶液、 Na_2SO_4 溶液,表明复合盐溶液干湿循环作用下SSC动弹性模量的损伤劣化更为严重。

2.2.4 相对抗压强度

不同盐溶液干湿循环作用下试样的相对抗压强度如图7所示。图7中 f_d 为相对抗压强度。

由图7可知,各组试样的 f_d 均呈现先增加后降低的趋势,图7中前40次干湿循环为强化阶段,各组试样的抗压强度小幅增长,40次干湿循环后为损伤阶段,抗压强度逐渐降低。这是因为早期盐侵产物填充了混凝土的内部孔隙和微裂缝,压实了孔隙结构,因而提高了混凝土的强度^[28]。随着盐蚀反应继续进行,盐侵作用产生的膨胀应力和干湿交替下形成的结晶压力不断增大,微裂缝随之出现和发展,最终造成抗压强度显著降低。

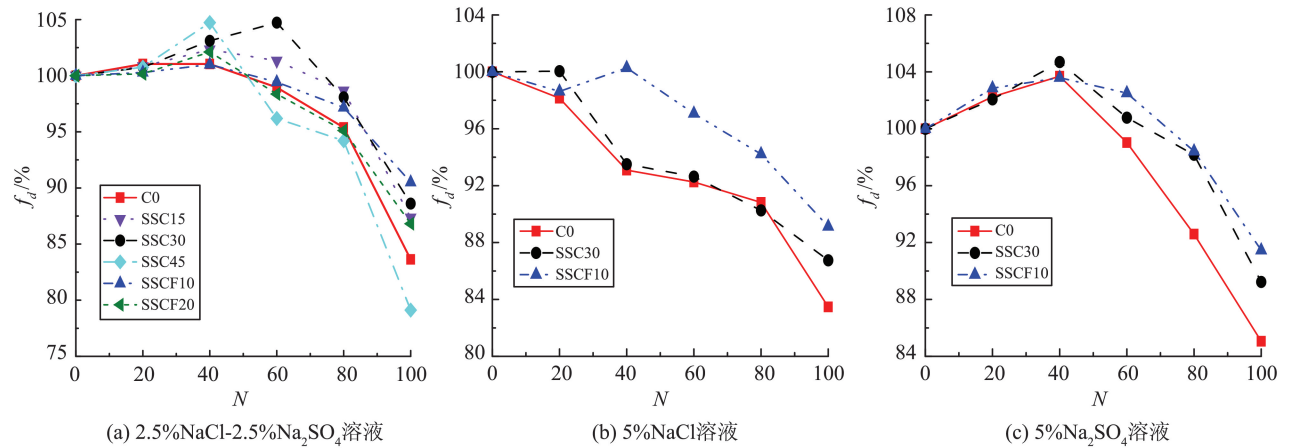


图7 不同盐溶液干湿循环作用下的相对抗压强度
Fig.7 Compressive strength of different salt solutions under dry-wet coupling

由图7(a)可知,在复合盐溶液中,经过100次干湿循环后,抗压强度损失率从小到大的试样依次为SSCF10、SSC30、SSC15、SSCF20、C0、SSC45,说明掺入30%体积分数的钢渣和10%体积分数的粉煤灰可有效抵御混凝土在盐侵和干湿耦合作用下的强度损失。对比图7(a)~(c),在强度损失阶段SSC30、SSCF10两组试样的抗压强度损失速率均低于C0组试块,100次干湿循环后,抗压强度损失率由小到大依次为SSCF10、SSC30、C0组。这也缘于钢渣水化产物填充了混凝土中的裂缝和孔隙,使混凝土密实度提高,延缓了盐离子的侵蚀。掺入适量的粉煤灰后,混凝土密实度进一步提高,抗侵蚀性能随之加强。在强度损失阶段,盐溶液干湿循环作用下试样的抗压强度

损失速率随循环进程逐渐增大,复合盐溶液中C0、SSC30、SSCF10三组试样的抗压强度损失速率前期变化比较缓慢且小于在单盐溶液中,但在80次干湿循环后明显加快,其抗压强度损失速率逐渐超过在单盐溶液中。总体而言,复合盐溶液干湿循环对SSC抗压强度的劣化作用更为明显。

3 损伤演化方程

在损伤力学中,可依据动弹性模量定义损伤变量^[29]

$$D_N = 1 - \frac{E_N}{E_0} \quad (1)$$

式中: D_N 为动弹性模量损伤值; E_0 为未干湿循环时的动弹性模量, Gpa; E_N 为干湿循环 N 次时的动弹性模量, Gpa。

混凝土在不同盐溶液干湿作用下损伤劣化具有变加速特征,以动弹性模量定义的损伤变量劣化轨迹符合指数函数变化,公式为

$$D_N = aN^b, \quad (2)$$

式中 a, b 为常数。

损伤劣化方程的一次导数为损伤速度,对式(2)求导得到其损伤速度

$$V_N = abN^{b-1}. \quad (3)$$

根据动弹性模量试验结果,通过式(2)计算出不同盐溶液干湿循环作用下混凝土的损伤值,使用 Origin 软件拟合得到不同盐溶液干湿作用下的损伤劣化方程见表 5,其拟合曲线和损伤速度曲线如图 8、9 所示。

表 5 盐溶液干湿损伤模型
Table 5 Dry and wet damage model of salt solution

盐溶液	编号	干湿损伤模型	损伤速度曲线	模型拟合精度
2.5%NaCl-2.5%Na ₂ SO ₄ 溶液	C0	$D_N = 5.14771 \times 10^{-5} N^{1.79158}$	$V_N = 9.22253 \times 10^{-5} N^{0.79158}$	0.998
	SSC15	$D_N = 1.22884 \times 10^{-4} N^{1.62483}$	$V_N = 1.99666 \times 10^{-4} N^{0.62483}$	0.989
	SSC30	$D_N = 2.47509 \times 10^{-5} N^{1.92555}$	$V_N = 4.76591 \times 10^{-5} N^{0.92555}$	0.998
	SSC45	$D_N = 1.38454 \times 10^{-4} N^{1.60320}$	$V_N = 2.21969 \times 10^{-4} N^{0.60320}$	0.997
	SSCF10	$D_N = 8.69431 \times 10^{-6} N^{2.13398}$	$V_N = 1.85534 \times 10^{-5} N^{1.13398}$	0.996
	SSCF20	$D_N = 5.52185 \times 10^{-5} N^{1.77528}$	$V_N = 9.80283 \times 10^{-5} N^{0.77528}$	0.998
5%NaCl 溶液	C0	$D_N = 5.78649 \times 10^{-5} N^{1.73613}$	$V_N = 1.00461 \times 10^{-4} N^{0.73613}$	0.999
	SSC30	$D_N = 2.87409 \times 10^{-5} N^{1.85592}$	$V_N = 5.33408 \times 10^{-5} N^{0.85592}$	0.998
	SSCF10	$D_N = 1.34742 \times 10^{-5} N^{1.98232}$	$V_N = 2.67102 \times 10^{-5} N^{0.98232}$	0.999
5%Na ₂ SO ₄ 溶液	C0	$D_N = 1.99553 \times 10^{-5} N^{1.94357}$	$V_N = 3.87845 \times 10^{-5} N^{0.94357}$	0.996
	SSC30	$D_N = 9.10936 \times 10^{-6} N^{2.08684}$	$V_N = 1.90098 \times 10^{-5} N^{1.08684}$	0.998
	SSCF10	$D_N = 3.08162 \times 10^{-6} N^{2.29925}$	$V_N = 0.70854 \times 10^{-5} N^{1.29925}$	0.995

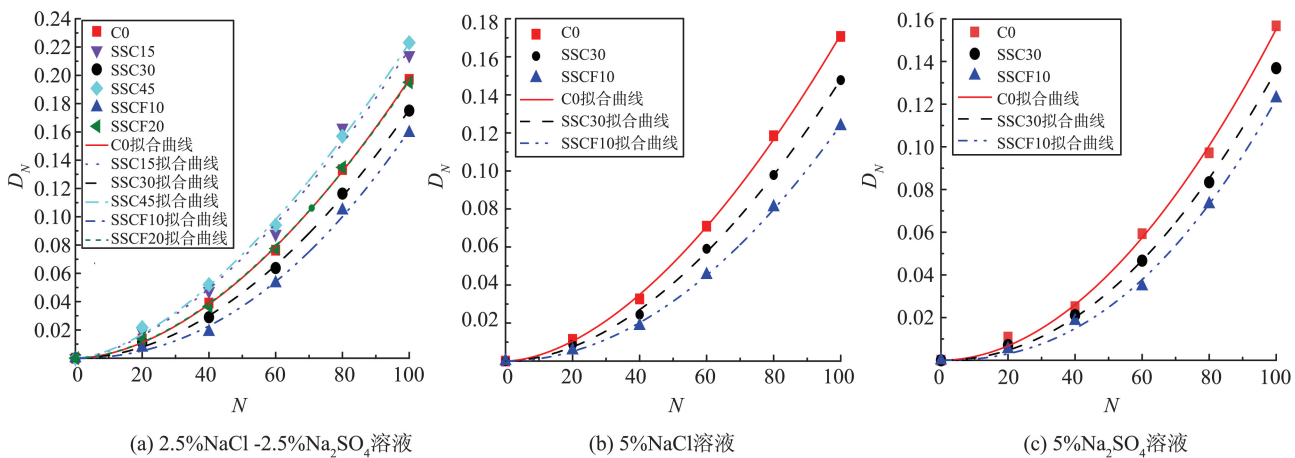


图 8 不同盐溶液干湿循环作用下损伤值拟合结果

Fig.8 The fitting results of damage values under the coupling of dry and wet cycles of different salt solutions

由图 8 可知,各组试样的 D_N 均随着干湿循环的进行而增大,且增长速度不断加快。由图 8(a)可知,复合盐溶液干湿循环作用下, D_N 从小到大的试样依次为 SSCF10、SSC30、SSCF20、C0、SSC15、SSC45,说明掺入 30% 体积分数的钢渣和 10% 体积分数的粉煤灰可有效抵御混凝土在盐侵和干湿耦合作用下的损伤劣化。对比图 8(a)~(c)发现,在

整个干湿循环周期,SSC30、SSCF10 两组试样的 D_N 均低于 C0 组,且 SSCF10 组试样 D_N 明显小于 SSC30 组。100 次盐溶液干湿循环后,造成 SSC30、SSCF10、C0 三组试样 D_N 由高到低的盐侵环境依次为复合盐溶液、NaCl 溶液、Na₂SO₄ 溶液。

由图 9 可知,各组试样的 V_N 随着干湿循环的进行而增大。图 9(a)显示,在复合盐溶液中,SSCF10

组试样的 V_N 最小,其次为 SSC30 组。对比图 9(a)~(c)发现,在不同盐溶液中,整个干湿循环周期, V_N 从大到小的试样依次为 C0、SSC30、SSCF10,说明掺入 30% 体积分数的钢渣可以延缓混凝土的损伤速度,在此基础上掺入 10% 体积分数的粉煤灰

可进一步缓解盐溶液干湿循环作用下钢渣细骨料混凝土的损伤速度。经过 100 次干湿循环后,各组试样在复合盐溶液的损伤速度大于单盐溶液,表明复合盐干湿循环作用对混凝土造成的损伤更为严重。

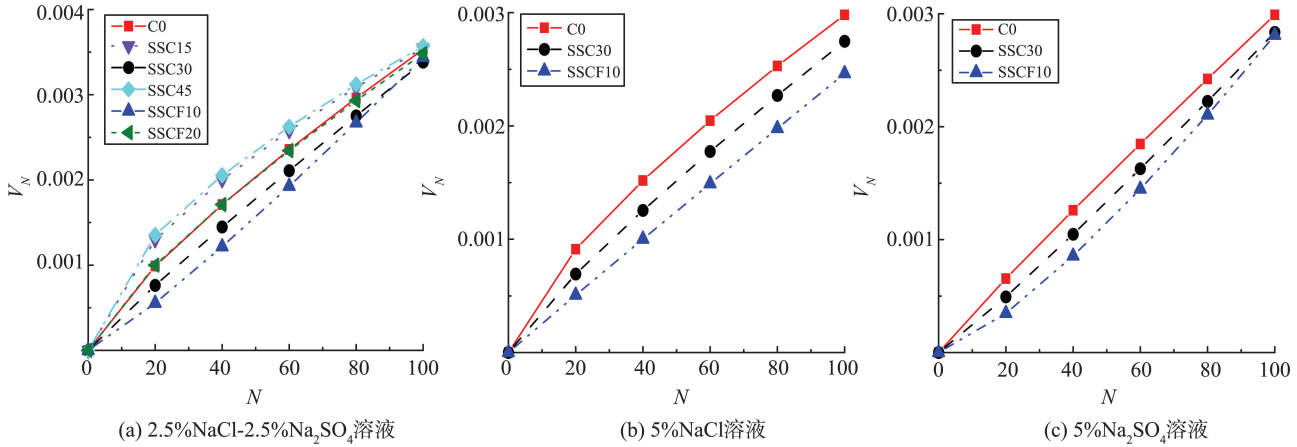


图9 损伤速度曲线
Fig.9 Damage velocity curve

4 结论

(1) 随着钢渣体积分数增加,试样的 28 d 抗压强度、抗折强度、动弹性模量先增加后减小,钢渣细骨料最佳体积分数为 30%,其抗压强度、抗折强度、动弹性模量相较于普通混凝土分别提高 0.73%、3.45%、8.69%,继续掺入 10% 体积分数的粉煤灰后,SSC 抗压强度、抗折强度、动弹性模量分别提高 4.35%、3.77%、0.78%。

(2) 钢渣体积分数为 30% 的 SSC 能够更好地抵抗干湿侵蚀,100 次盐溶液干湿循环作用后,其质量损失率、动弹性模量损失率、抗压强度损失率相较于普通混凝土分别降低 29.2%、2.6%、5.0%;继续掺入 10% 体积分数的粉煤灰,SSC 质量损失率、动弹性模量损失率、抗压强度损失率进一步降低约 2%~7%,耐久性进一步提高;复合盐溶液中 SSC 的损伤劣化高于单盐溶液。

(3) 依据不同盐溶液干湿循环作用下试样动弹性模量变化建立了损伤演化方程,拟合结果可以较好地描述试样损伤的发展过程,损伤演化方程拟合度均高于 0.9,可以较好地反映盐溶液干湿环境下混凝土的劣化规律。

参考文献:

[1] 赵令,程峥明,郑伟成,等. 改性钢渣/橡胶复合材料导热性能及耐久性研究[J]. 工程科学学报, 2023, 45

(5):765-773.

ZHAO Ling, CHENG Zhengming, ZHENG Weicheng, et al. Studies on thermal conductivity and durability of modified steel slag/rubber composites [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(5): 765-773.

[2] 张浩,韩伟胜,程峥明,等. 基于 SEM 与 FTIR 研究改性钢渣/橡胶复合材料的热氧老化机理[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(12):3906-3912.

ZHANG Hao, HAN Weisheng, CHENG Zhengming, et al. Thermal oxidative aging mechanism of modified steel slag/rubber composites based on SEM and FTIR [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(12): 3906-3912.

[3] 吴跃东,彭霖,吴龙,等. 国内外钢渣处理与资源化利用技术发展现状综述[J]. 环境工程, 2021, 39(1): 161-165.

WU Yuedong, PENG Ben, WU Long, et al. Review on global development of treatment and utilization of steel slag [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(1): 161-165.

[4] 冯忠居,陈慧芸,王富春,等. 强盐沼泽区干湿循环作用下桥梁桩基腐蚀损伤[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(6): 156-167.

FENG Zhongju, CHEN Huiyun, WANG Fuchun, et al. Corrosion damage of bridge pile foundations under dry-wet cycles in strong salt marsh areas [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 156-167.

[5] 王伯昕,黄智鑫,毕广泽. 干湿循环作用下吉林省西部

- 土壤盐离子对混凝土的侵蚀破坏机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(2): 558-569.
- WANG Boxin, HUANG Zhixin, BI Guangze. Mechanism of ion erosion on concrete under action of dry-wet cycles [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(2): 558-569.
- [6] 路承功, 魏智强, 乔宏霞, 等. 盐渍土地区混凝土加速寿命试验可靠性分析方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(3): 1017-1026.
- LU Chengong, WEI Zhiqiang, QIAO Hongxia, et al. Reliability analysis method of accelerated life test of concrete in saline soil area[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3): 1017-1026.
- [7] ZHU P C, LIANG N H, LIU X R, et al. Investigation of the mechanical and durability properties of concrete containing modified fly ash and modified zeolite powder: an effective transport model for sulfate ions in concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 95: 110068.
- [8] ZHOU Q S, LU C F, WANG W, et al. Effect of fly ash and sustained uniaxial compressive loading on chloride diffusion in concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 31: 101394.
- [9] CHENG X, TIAN W, GAO J F, et al. Performance evaluation and lifetime prediction of steel slag coarse aggregate concrete under sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2022, 344: 128203.
- [10] 吕国儿, 尚进, 黄珊珊, 等. 硫酸盐和氯盐对砂浆宏观观力学性能的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(2): 159-166.
- LÜ Guoer, SHANG Jin, HUANG Shanshan, et al. Macro-and micro-mechanical properties of mortar under sulfate and chloride attack[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35(2): 159-166.
- [11] DEHESTANI A, HOSSEINI M, TALEB BEYDOKHTI A. Effect of wetting-drying cycles on mode I and mode II fracture toughness of cement mortar and concrete[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 106: 102448.
- [12] 赵喜云, 吴建华. 氯盐干湿循环作用下混凝土力学性能与孔结构变化研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(4): 220-226.
- ZHAO Xiyun, WU Jianhua. Study on concrete mechanical performance and pore structure change under effect of chlorine salt dry-wet cycle [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(4): 220-226.
- [13] WANG K, GUO J J, LIU X J, et al. Effect of dry-wet ratio on pore-structure characteristics of fly ash concrete under sulfate attack[J]. Materials and Structures, 2021, 54(3): 100.
- [14] 董瑞鑫, 申向东, 薛慧君, 等. 干湿循环作用下风积沙混凝土的抗硫酸盐侵蚀机理[J]. 材料导报, 2020, 34(24): 24040-24044.
- DONG Ruixin, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Sulfate resistance mechanism of aeolian sand concrete under dry-wet cycles [J]. Materials Reports, 2020, 34(24): 24040-24044.
- [15] 董瑞鑫, 申向东, 薛慧君, 等. 干湿循环作用下风积沙混凝土的抗硫酸盐耐久性[J]. 材料导报, 2020, 34(20): 20053-20060.
- DONG Ruixin, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Sulfate durability of aeolian sand concrete under dry-wet cycles and sand blowing [J]. Materials Reports, 2020, 34(20): 20053-20060.
- [16] 张江涛, 郭鑫, 张洪滔, 等. 不同地域和工艺制备钢渣的矿物组成与胶凝活性研究[J]. 混凝土, 2024(5): 93-97.
- ZHANG Jiangtao, GUO Xin, ZHANG Hongtao, et al. Mineral composition and cementitious activity of steel slag prepared by different processes in different regions [J]. Concrete, 2024(5): 93-97.
- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 建设用砂: GB/T 14684—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [18] 国家质量技术监督局. 水泥压蒸安定性试验方法: GB/T 750—1992[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [20] SAHA A K. Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete [J]. Sustainable Environment Research, 2018, 28(1): 25-31.
- [21] YU X T, CHEN D, FENG J R, et al. Behavior of mortar exposed to different exposure conditions of sulfate attack[J]. Ocean Engineering, 2018, 157: 1-12.
- [22] 郭丽萍, 张健, 曹园章, 等. 超高性能水泥基材料复合盐侵蚀研究: 合成Friedel盐和钙矾石在硫酸盐和氯盐溶液中的稳定性[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 132-137.
- GUO Liping, ZHANG Jian, CAO Yuanzhang, et al. A study for compound salts attack on ultra-high performance cement-based materials: the stabilities of chemically synthesized friedel salt and ettringite in solutions of sulfates and chloride salts [J]. Materials Review, 2017, 31(23): 132-137.
- [23] 王成, 田青, 张苗, 等. 干湿循环对混凝土性能的影响

- 研究综述[J]. 材料导报, 2023, 37(增刊2): 208-217.
WANG Cheng, TIAN Qing, ZHANG Miao, et al. Influence of wetting-drying cycle on concrete properties: a review [J]. Materials Review, 2023, 37 (Suppl. 2): 208-217.
- [24] LAI M H, ZOU J J, YAO B Y, et al. Improving mechanical behavior and microstructure of concrete by using BOF steel slag aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2021, 277: 122269.
- [25] SUN X S, LI Y J, WEI X L, et al. High contents of steel slag in the road concrete: hydration mechanism, mechanical property and durability performance [J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132703.
- [26] 韩长君, 周海龙, 陈岩, 等. 粉煤灰对高强混凝土力学性能及孔隙结构影响[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(4): 410-417.
HAN Changjun, ZHOU Hailong, CHEN Yan, et al. Effect of fly ash on mechanical properties and pore structure of high-strength concrete [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(4): 410-417.
- [27] 翟思敏, 黄金霞. 建筑用不同取代率粉煤灰再生混凝土的力学性能及耐久性性能研究[J]. 功能材料, 2024, 55(4): 4121-4126.
ZHAI Simin, HUANG Jinxia. Study on the mechanical properties and durability of recycled fly ash concrete with different substitution rates for construction [J]. Journal of Functional Materials, 2024, 55(4): 4121-4126.
- [28] FANG Y, YAO Z S, LI X W, et al. Durability of reactive powder concrete of drilling shaft and triaxial compression damage constitutive model under composite salt erosion [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 62: 105395.
- [29] LØLAND K E. Continuous damage model for load-response estimation of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1980, 10(3): 395-402.
- (编辑:郭少华)
-
- (上接第129页)
- [22] 朱晓天. 渗流作用下粉质黏土地层超深基坑危害数值模拟分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(2): 98-106.
ZHU Xiaotian. Numerical simulation analysis of ultra-deep foundation pit hazard in silty clay stratum under seepage [J]. Tunnel and underground engineering disaster prevention and control, 2022, 4(2): 98-106.
- [23] 朱嘉敏. 钢板桩格形围堰三维有限元数值分析及施工方法探究[D]. 北京:中国地质大学, 2020.
ZHU Jiamin. Three-dimensional finite element numerical analysis and construction method of steel sheet pile lattice cofferdam [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [24] MAWER R W, BYFIELD M P. Reduced modulus action in U-section steel sheet pile retaining walls [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineer, 2010, 136(3): 439-444.
- [25] DIBIAGIO E. Field instrumentation: a geotechnical tool [M]. Norwegian: Norwegian Geotechnical Institute Pub, 1977: 29-40.
- [26] 赵明华. 土力学与基础工程[M]. 4版. 武汉理工大学出版社, 2014: 122-129.
- [27] 肖杰. 并排新-旧组合路堤桩板墙协同作用机理的模型试验研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2022.
XIAO Jie. Model test study on synergistic mechanism of pile-slab wall of side-by-side new-old composite embankment [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [28] BS8002: Earth retaining structures [S]. London: BSI, 1994.
- (编辑:郭少华)