

冻融循环及硫酸盐侵蚀双因素下面板混凝土耐久性研究

李阳, 王瑞骏, 程金标, 荆慧斌, 牛文龙
(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 冻融循环与硫酸盐侵蚀是影响面板混凝土耐久性的两个主要因素。研究了水灰比为 0.45、0.42、0.38 的面板混凝土在 5.0% (质量分数) 硫酸钠溶液中单一冻融循环、单一硫酸盐侵蚀及冻融循环及硫酸盐侵蚀交替试验下面板混凝土的质量损失率及相对动弹模量变化规律和特点。结果表明: 水灰比越小, 面板混凝土的抗冻性及抗硫酸盐侵蚀能力越强。冻融破坏与硫酸盐侵蚀双因素作用不是简单的相互叠加的效应, 而是超叠加效应, 这两种破坏是相互促进, 相互影响。本文的研究方法及成果可以为面板混凝土耐久性研究提供重要的参考依据。

关键词: 面板混凝土; 耐久性; 冻融循环; 硫酸盐侵蚀

中图分类号: TV641.43

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)05-0177-05

Study on durability of panel concrete under combined actions of freeze-thaw cycle and sulfate attack

LI Yang, WANG Ruijun, CHENG Jinbiao, JING Huibin, NIU Wenlong

(Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China.)

Abstract: Freeze-thaw cycle and sulfate attack are two important factors that affect the durability of panel concrete. The paper studied the mass loss rate, the variation law and feature of relative dynamic modulus of panel concrete with water to cement ratio of 0.45, 0.42, 0.38 under freeze-thaw cycles, sulfate attack and the alternation test in solutions of 5.0% Na_2SO_4 . The results show that the less the water cement ratio, the stronger the ability of face slab concrete of resistance to frost and sulfate erosion becomes. The effect of double factors of freeze-thaw cycle and sulfate attack is not a simple mutual superposition, but is a super superposition effect. The two kinds of damage is promoted and impacted each other. The result can provide a reference for the research of durability of panel concrete.

Key words: panel concrete; durability; freeze-thaw cycle; sulfate attack

1 研究背景

我国北方寒冷地区水、土壤中含有丰富的硫酸盐, 面板混凝土在遭受硫酸盐侵蚀和冻融循环共同作用时, 较单一因素作用会产生更严重的破坏, 影响面板混凝土结构的耐久性^[1-4]。因此开展硫酸盐侵蚀与冻融循环共同作用下混凝土耐久性破坏研究有着重要的理论与工程实际意义。

近年来我国学者逐步开展了一些针对冻融循环与硫酸盐侵蚀共同作用下混凝土耐久性的研究工作。马锋玲等^[5], 通过研究结合坝高 233 m 的水布

埝混凝土面板堆石坝, 进行面板混凝土配合比优化及混凝土改性研究, 提出保证面板混凝土抗溶蚀耐久性的必要条件和提高面板混凝土抗冻性、抗裂性、抗渗性的途径。梁文泉等^[6] 针对面板混凝土需要简化温控、提高抗裂和耐久性的要求, 提出高掺粉煤灰与减水剂共同作用的混凝土制备方法, 并进行了相关试验研究。结果表明, 粉煤灰掺量与减水剂掺量对面板混凝土耐久性具有重要的影响。葛勇等^[7] 对引气与非引气混凝土在不同浓度硫酸钠溶液中抗冻性进行了研究, 指出强度不同的混凝土在硫酸盐溶液和水中的抗冻性有所不同, 适量引气剂

收稿日期: 2015-05-13; 修回日期: 2015-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779051)

作者简介: 李阳(1991-), 男, 陕西延安人, 在读博士, 主要从事水工结构分析及数值仿真研究。

通讯作者: 王瑞骏(1963-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 教授, 主要从事坝工应力研究。

能够较好地改善混凝土的抗冻性。杨德福等^[8]以水布垭工程为依托,经基础理论和机理分析及大量实验研究和计算,对面板混凝土耐久性进行了深入研究,获得了多项重要研究成果,尤其对200 m级高面板堆石坝,得出了面板遭受硫酸盐侵蚀破坏及在高水头、高水力梯度作用下面板抗硫酸盐侵蚀及抗溶蚀性能耐久性是有保证的重要结论。王德库等^[9]以小山水电站为依托,对其面板混凝土耐久性能进行研究,并且结合小山水电站面板混凝土配合比设计,对面板混凝土的性能进行了较为系统的试验研究。从而为面板混凝土的最优设计奠定了基础,解决了严寒地区水工面板混凝土的抗冻耐久性问题。

目前,对于冻融循环及硫酸盐侵蚀共同作用下的面板混凝土耐久性研究文献相对较少^[10-12]。因此,本文将通过对面板混凝土质量损失率与相对动

弹模量的研究分析冻融循环及硫酸盐侵蚀共同作用下面板混凝土破坏规律,为冻融循环与硫酸盐侵蚀共同作用下面板混凝土结构耐久性研究与设计提供参考。

2 试验

2.1 试验材料及混凝土配合比

水泥:陕西秦岭水泥厂 P. O42.5R 水泥。粉煤灰:渭河电厂 II 级粉煤灰。骨料:霸河中砂,细度模数 2.5,汾河卵石,粒径 5~16 mm。减水剂:西安市红旗外加剂厂聚羧酸高效减水剂。引气剂:三萜皂甙高效引气剂。水:普通自来水。28 d 抗压强度测定时,每个配合比试件进行 3 组试验取平均值得到抗压强度。面板混凝土配合比及力学性能如表 1 所示。

表 1 面板混凝土配合比及力学性能

试件	面板混凝土配合比								28 d 抗压强度/ MPa	
	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粗骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	细骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉煤灰/%	引气剂/%	减水剂/%		水灰比
D1	287.38	128.5	654.39	635.15	635.15	50.71	0.03	1	0.45	29.8
D2	287.38	142.0	642.10	623.21	623.21	50.71	0.03	1	0.42	32.3
D3	287.38	152.0	626.65	614.45	614.45	50.71	0.03	1	0.38	36.1
L1	287.38	128.5	654.39	635.15	635.15	50.71	0.03	1	0.45	29.8
L2	287.38	142.0	642.10	623.21	623.21	50.71	0.03	1	0.42	32.3
L3	287.38	152.0	626.65	614.45	614.45	50.71	0.03	1	0.38	36.1
DL1	287.38	128.5	654.39	635.15	635.15	50.71	0.03	1	0.45	29.8
DL2	287.38	142.0	642.10	623.21	623.21	50.71	0.03	1	0.42	32.3
DL3	287.38	152.0	626.65	614.45	614.45	50.71	0.03	1	0.38	36.1

2.2 试件制作及试验方法

试验采用同一配合比试件,重点考虑溶液浓度及种类对混凝土冻融损伤的影响,单一的冻融循环试件分为 D1、D2、D3,单一的硫酸盐侵蚀时间分为 L1、L2、L3,冻融循环与硫酸盐侵蚀交替试验分为 DL1、DL2、DL3,每组 3 块共 12 块,尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm。混凝土浇注 24 h 后拆模,将试件放入标准养护室内养护 28 d,自然养护 60 d^[13-14]。

单一冻融循环试验:将养护至预定龄期的试件提前 4 d 分别放入水中浸泡,然后放入配有相应溶液的试件盒中,并将试件盒装入快速冻融试验箱,按照 GB/T82-09《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中抗冻性能试验的“快冻法”进行冻融试验。每 25 次结束时,测量试件的质量损失率及

相对动弹模量。单一的硫酸盐侵蚀试验:当试件到达 28 d 养护龄期时,到达试件龄期的前 2 d,将试件从标准养护箱取出,擦拭干表面水分,然后将试件放入烘箱中,烘干结束后将试件在干燥环境中冷却到室温。将试件放入硫酸盐干湿循环试验机,按照 GB/T82-09《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中“硫酸盐干湿循环试验”进行硫酸盐侵蚀试验。每完成 15 次干湿循环应测定一次混凝土试件的自振频率和试件质量。冻融循环与硫酸盐侵蚀交替试验:冻融循环部分按照冻融循环试验进行,当冻融循环到达 25 次时,立即取出试件进行硫酸盐循环试验,步骤按照硫酸盐侵蚀试验操作,循环 15 次以后取出。重复以上循环。

试验现场如图 1、2 所示。

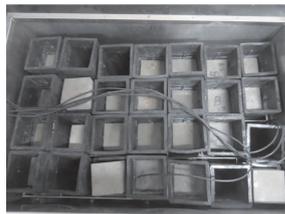


图1 冻融循环试验现场

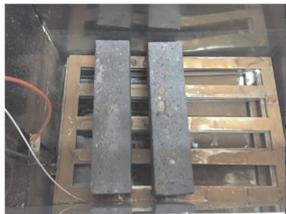


图2 硫酸盐侵蚀试验现场

2.3 试验结果的整理与分析方法

根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082 - 2009)相关要求,冻融循环试验评定指标为相对动弹弹性模量和质量损失率。硫酸盐侵蚀试验的评价指标是质量损失率和强度耐蚀系数。但是考虑到冻融循环与硫酸盐侵蚀共同作用时试验数据的分析更有对比性,综合考虑本试验评价指标为混凝土相对动弹模量与质量损失率^[15-17]。

2.3.1 质量损失率 质量损失率可以按式(1)计算,以3个试件试验结果的平均值为测定值。

混凝土试件冻融循环或硫酸盐侵蚀的质量损失率按式(1)计算:

$$W_n = \frac{G_0 - G_n}{G_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W_n 为质量损失率,%; G_0 为试件初始测试质量,kg; G_n 为试件经过 N 次循环后的质量,kg。

2.3.2 相对动弹模量 混凝土的相对动弹模量可以按式(2)计算,以3个试件试验结果的平均值为测定值。

混凝土试件冻融循环或硫酸盐侵蚀的相对动弹模量按式(2)计算:

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_n 为经过 n 次冻融循环或干湿循环后试件相对动弹弹性模量,%; f_0 为试件冻融循环或硫酸盐干湿循环前的自振频率,Hz; f_n 为试件冻融循环或硫酸盐干湿循环 n 次后的自振频率,Hz。

3 试验结果与分析

3.1 单一冻融循环试验

从图3可以看出:当冻融循环次数较小时,D1,D2,D3的试件质量均有所提升,原因是在冻融开始阶段,试件吸收水分,表面掉渣极少,故其质量增加有所增加。随着冻融循环次数的增加,混凝土内部及表面出现轻微裂缝,导致试件表面出现掉渣。此时,由于试件吸收的水分的质量小于试件表面及冻胀裂缝中剥落的混凝土质量,质量减少。所以在图

中可以看到试件质量先增大,随着时间的增加,慢慢减小。D1,D2,D3三条曲线,随着试件的增加,到达300次冻融循环过程中,可以看出D1中的混凝土质量损失率最大,D3中的质量损失率最小。说明随着水灰比的减小,面板混凝土的抗冻性能逐渐增强。

从图4可以看出:D1,D2,D3组面板混凝土试件,随着冻融次数的增加,其相对动弹模量不断下降。到达300次冻融循环时,D3组的试件相对动弹模量值最大,D1组的动弹模量值最小。D3,D2,D1动弹模量值依次减小,可以看出随着水灰比的减小,面板混凝土的动弹模量值越大,混凝土劣化程度较小。

3.2 单一硫酸盐侵蚀试验

从图5可以看出:在经历180次硫酸盐干湿循环后,L1,L2,L3试件组质量损失率都不大,分别为0.2%,0.11%,-0.06%。其中L1,L2组试件质量在180次硫酸盐干湿循环后略微有所下降,而L3组试件质量仍然增加。从整体来看,质量损失率是一个先减小后增加的过程。其主要原因是干湿循环的结晶盐破坏是一个非常缓慢的结晶过程,干湿循环对试件质量损失率也不敏感。L1试件的曲线,大致分3个阶段,第一过程是试件的质量增加的阶段;第二过程是质量损失率的一个平缓过渡阶段;第三个过程是试件质量的迅速下降阶段,出现掉渣现象。然而L3试件组,试件密度较高,溶液不易侵入,因而不产生钙矾石与石膏。在180次硫酸盐干湿循环中,质量损失率一直处于负值,试件的表面以及内部没有发生明显的破坏。从循环结束的质量损失率来看,L1试件组质量损失率最大,L3组质量损失率最小。可以分析:水灰比越小,面板混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力越强。

从图6可以看出:在75次干湿循环之中,L1、L2、L3相对动弹模量变化值基本相差不大。75次冻融循环以后,L3组试件相对动弹模量开始下降。而L1,L2组试件还要经历一段上升的过程。到达180次干湿循环以后,从图中可以看出L1、L2、L3的相对动弹模量分别为84.96%,89.02%,94.02%,水灰比为0.38的试件组在经历180次硫酸盐冻融循环后相对动弹模量最大,水灰比为0.45的试件组经历180次硫酸盐冻融循环后相对动弹模量最小。L3试件的水灰比低,结构密实,能够承受的结晶压力也更大,所以相对动弹弹性模量的上升阶段要长于L1、L2试件。水灰比对面板混凝土抗硫酸盐侵蚀有一定的影响,水灰比越小,混凝土抗硫酸盐侵蚀能力越强。

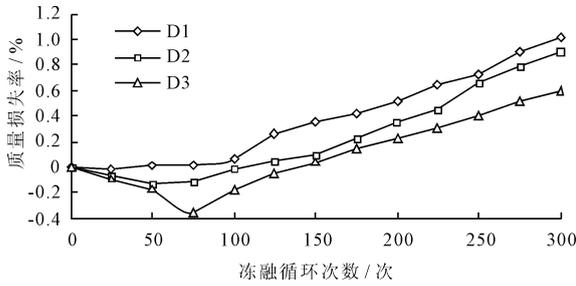


图3 各组试件质量损失率曲线

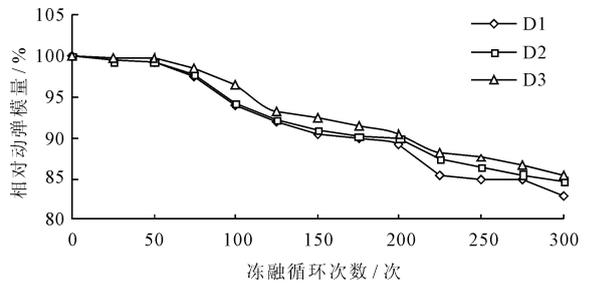


图4 各组试件相对动弹模量曲线

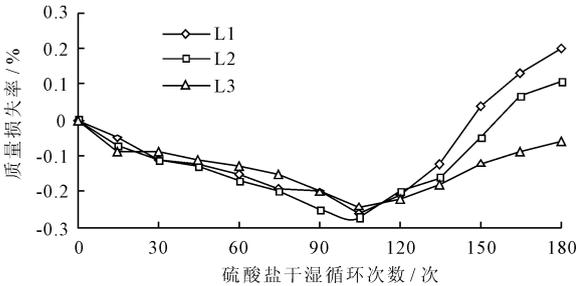


图5 各组试件质量损失率曲线

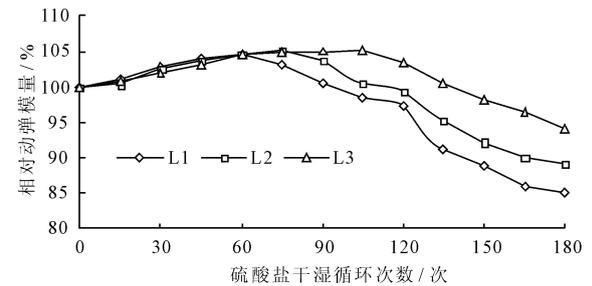


图6 各组试件相对动弹模量曲线

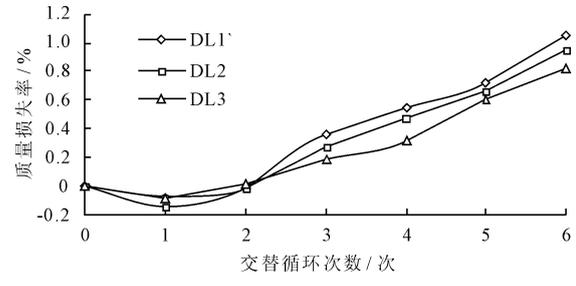


图7 各组试件质量损失率曲线

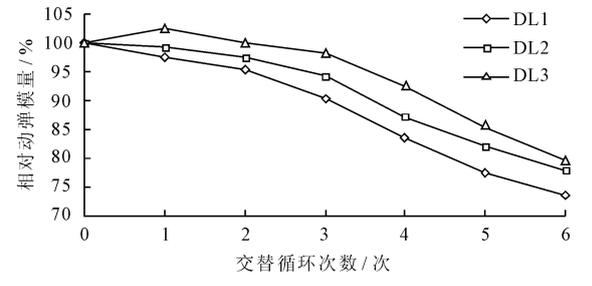


图8 各组试件相对动弹模量曲线

3.3 交替试验

从图7可以看出,在交替循环的前两次,各组试件经历一个质量增加的过程。在第二次循环末期,可以看出此时3组试件的质量损失率相等。随着循环次数的增加,各组试件的质量损失率呈现不同的增长趋势,DL1增长最快,DL3增长最慢。分析原因:主要还是由于水灰比对试件的质量损失率的影响,水灰比小的试件其空隙量少、结构密实、强度高,试件能抑制溶液的侵入。到达6次交替循环以后,DL1、DL2、DL3三组试件的质量损失率分别为1.05%、0.95%、0.82%。可以看出在冻融循环与硫酸盐干湿循环交替试验下,水灰比仍然是重要的影响因素,水灰比越小,面板混凝土的抗冻及抗硫酸盐侵蚀耐久性越好;水灰比越大,面板抗冻及抗硫酸盐侵蚀耐久性越差。

从图8可以看出:3组试件的相对动弹模量大致可以分为两个阶段:第一阶段是相对模量较为平缓的下降过程,表现在前2次循环中。第二阶段为试件加速破坏过程,从图中可以看到在4~6次循环中,试件相对动弹模量下降速率加快。到达6次交替循环以后,DL1、DL2、DL3各组试件的动弹模量分

别为73.56%、77.89%、79.59%。可以看出,试件经历交替循环以后,DL1试件组的相对动弹模量最低,表明其破坏最严重。DL1为水灰比为0.45的面板混凝土试件,可以看出:水灰比越大,面板混凝土抗冻及抗硫酸盐侵蚀性能越差。

3.4 交替试验与单一试验下叠加的比较

交替循环6次,经历了冻融循环150次,硫酸盐干湿循环90次。质量损失率、相对动弹模量叠加见表2、3。

表2 150次冻融循环与90次硫酸盐侵蚀质量损失率叠加结果

试件组	D1	D2	D3
150次冻融循环后质量损失率	0.36	0.10	0.04
试件组	L1	L2	L3
90次干湿循环后质量损失率	-0.20	-0.25	-0.20
二者叠加	0.08	-0.075	-0.08

由表2可以看出:当二者叠加以后,经历150次冻融循环及90次硫酸盐干湿循环后,水灰比为0.45、0.42、0.38的面板混凝土试件的质量损失率为0.08%、-0.075%、-0.08%。冻融破坏和硫酸盐

侵蚀交替破坏6次以后,水灰比为0.45、0.42、0.38的面板混凝土试件的质量损失率为1.05%、0.95%、0.82%。前者的质量损失率明显小于后者。

表3 150次冻融循环与90次硫酸盐侵蚀
相对动弹模量叠加结果

试件组	D1	D2	D3
150次冻融循环后相对动弹模量	90.42	91.00	92.45
试件组	L1	L2	L3
90次干湿循环后相对动弹模量	100.56	103.83	105.01
二者叠加	95.49	97.42	98.73

由表3可以看出:当二者叠加以后,经历150次冻融循环及90次硫酸盐干湿循环后,水灰比为0.45、0.42、0.38的面板混凝土试件的相对动弹模量为95.49%、97.42%、98.73%。冻融破坏和硫酸盐侵蚀交替破坏6次以后,水灰比为0.45、0.42、0.38的面板混凝土试件的相对动弹模量为73.56%、77.89%、79.54%。前者的相对动弹模量值明显大于后者,交替循环后动弹模量值比单一破坏叠加后分别减少21.56%、19.53%、19.19%。

经过上述可得试件在经过冻融循环与硫酸盐侵蚀交替试验的试件的劣化程度比硫酸盐侵蚀与冻融循环的简单叠加更加严重。主要是因为冻融与硫酸盐侵蚀初期都能产生细微的网状裂纹,当交替试验时硫酸盐侵蚀产生的裂纹能加速冻融破坏,而冻融产生的裂纹又能加速硫酸盐侵蚀。单一的冻融循环与单一的硫酸盐侵蚀破坏,没有这两种裂纹的相互影响效应,所以交替试验的劣化程度更高。

4 结 语

通过试验研究得出以下结论:

(1)水灰比对面板混凝土的抗冻性及抗硫酸盐侵蚀性能影响较大,水灰比越小,面板混凝土的抗冻性及抗硫酸盐侵蚀能力越强。在300次冻融循环中,面板混凝土试件的冻融循环大致可以分3个阶段:第一阶段为前125次冻融循环,是一个加速破坏过程。第二阶段随着试件表面出现掉渣、剥落,冻融循环对试件结构的破坏相对比较慢,破坏速率有所放缓。第三阶段有骨料剥落,试件破坏速率有所加快。硫酸盐侵蚀大致分三个阶段,第一过程是试件的质量或相对动弹模量增加的阶段;第二过程是质量或相对动弹模量一个平缓过渡阶段;第三个过程是试件质量或相对动弹模量的迅速下降过程,出现掉渣现象。

(2)随着时间的增长,冻融循环和硫酸盐侵蚀

双重破坏加速了混凝土力学性能的劣化。交替破坏下面板混凝土试件质量损失率明显增大,相对动弹模量明显较少。冻融循环与硫酸盐侵蚀双因素作用不是简单的相互叠加的效应,而是超叠加效应。

参考文献:

- [1] 金伟良,吕清芳,赵羽习,等. 混凝土结构耐久性设计方法与寿命预测研究进展[J]. 建筑结构学报,2007,28(1):7-13.
- [2] 王复生,孙瑞莲,秦小鹏. 察尔汗盐湖条件下水泥混凝土耐久性调查研究[J]. 硅酸盐通报,2002(4):16-22+35.
- [3] 慕儒,缪昌文,刘加平,等. 硫酸钠溶液对混凝土抗冻性的影响[J]. 建筑材料学报,2001,4(4):311-316.
- [4] 宿晓萍,张利,郭金辉. 单盐侵蚀与冻融循环作用下混凝土耐久性能试验研究[J]. 工业建筑,2014,44(9):110-113+6.
- [5] 马锋玲,杨德福,王少江. 高混凝土面板堆石坝面板混凝土抗裂和耐久性研究[C]//. 水力发电国际研讨会论文集,北京:中国水利水电科学研究院,2004.
- [6] 梁文泉,何芸,何金荣,等. 高掺粉煤灰面板混凝土耐久性的研究[J]. 混凝土与水泥制品,2009(2):14-16.
- [7] 葛勇,杨文萃,袁杰,等. 混凝土在硫酸盐溶液中抗冻性的研究[J]. 混凝土,2005(8):71-73+79.
- [8] 杨德福,马锋玲. 面板混凝土抗裂与耐久性研究[J]. 水力发电,2001(8):42-43+68.
- [9] 王德库,李艳萍,潘云双. 小山水电站大坝面板混凝土的试验研究[J]. 水力发电,1998(5):20-22+28.
- [10] 陈四利,宁宝宽,胡大伟. 硫酸盐和冻融双重作用对混凝土力学性质的影响[J]. 工业建筑,2006,36(12):12-15.
- [11] 张云清,余红发,孙伟,等. 冻融循环作用下混凝土的硫酸盐应力腐蚀特性[J]. 土木建筑与环境工程,2010,32(6):147-152.
- [12] 吴鹏. 硫酸盐和冻融循环耦合作用下活性粉末混凝土物理力学性能研究[J]. 混凝土与水泥制品 2015(2):10-15.
- [13] 何振军,宋玉普. 高温后高强高性能混凝土双轴压力学性能[J]. 力学学报,2008,40(3):364-374.
- [14] 王怀义,万连兵,桂杨权,等. 混凝土在硫酸盐侵蚀及冻融环境下的试验研究方法[J]. 粉煤灰,2014(1):31-33.
- [15] 凌立,陈勇. 高性能混凝土抗冻融性能试验研究[J]. 混凝土,2009(4):49-50+53.
- [16] 唐光普,刘西拉,施士升. 冻融条件下混凝土破坏面演化模型研究[J]. 岩石力学与工程报,2006,25(12):2572-2578.
- [17] 周志云,孙敏,吕礼春. 混凝土冻融变形的试验研究[J]. 混凝土,2010(4):20-22+27.