

混凝土抗盐冻性能试验

闫西乐^{1,2}, 张 萍^{1,2}, 秦鸿根^{1,2}, 庞超明^{1,2}, 孙 伟^{1,2}

(1. 东南大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189; 2. 江苏省土木工程材料重点实验室, 江苏 南京 211189)

摘要:为研究混凝土强度等级、矿物掺合料和含气量对其抗盐冻性能的影响,对混凝土进行了盐溶液条件下的快速冻融试验。通过硬化混凝土气泡参数测定验证了新拌混凝土含气量与硬化混凝土含气量之间的相关性,对混凝土外观、相对动弹性模量、累积剥落量随冻融循环次数变化规律进行了分析,研究了不同强度等级、矿物掺合料、含气量等因素对混凝土抗盐冻性能的影响趋势。结果表明:单纯提高强度等级并不一定利于混凝土抗盐冻性能的改善,对中低强度的混凝土而言,含气量是影响其抗盐冻性能的决定性因素;粉煤灰与矿渣粉的掺量应控制在一定范围内。

关键词:混凝土;抗盐冻性能;盐溶液;剥落量;含气量;相对动弹性模量

中图分类号: TU502 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2016)02-0042-04

Experimental study of frost-salt resistance of concrete//YAN Xile^{1,2}, ZHANG Ping^{1,2}, QIN Honggen^{1,2}, PANG Chaoming^{1,2}, SUN Wei^{1,2}(1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Civil Engineering Materials, Nanjing 211189, China)

Abstract: In order to study the influence of concrete strength grade, volumes of fly ash and slag powder, and air-entraining content on the frost-salt resistance of concrete, an accelerated freeze-thaw test of concrete in salt solution was carried out. The correlation between the air-entraining contents of fresh concrete and hardened concrete was validated through measurement of bubble parameters of hardened concrete. The variation of surface characteristics, relative dynamic modulus of elasticity, and cumulative amount of spalling of concrete with the number of freeze-thaw cycles were investigated. The influence of concrete strength grade, volumes of fly ash and slag powder, and air-entraining content on the frost-salt resistance of concrete was examined. The results shows that a higher concrete strength does not always improve the frost-salt resistance, the air-entraining content is the decisive factor influencing the frost-salt resistance of medium-and low-strength grade concrete, and the volumes of fly ash and slag powder should be controlled within an appropriate range.

Key words: concrete; frost-salt resistance; salt solution; amount of spalling; air-entraining content; relative dynamic modulus of elasticity

混凝土盐冻破坏多发生于寒冷地区的海洋环境和除冰盐环境中,与一般冻融破坏相比,盐的存在使混凝土的饱水度提高,结冰压和渗透压增大,同时其结晶也会产生一定的膨胀作用,从而加剧混凝土的冻融损伤^[1]。因此,盐冻对混凝土的破坏要比一般冻融更加严重,如何使处于寒冷地区海洋环境和除冰盐环境中的混凝土结构满足抗盐冻性要求已成为近年来混凝土耐久性研究的重点。

Powers 等^[2-3]先后提出了静水压假说和渗透压假说,对混凝土冻融过程中孔隙水迁移方向进行了研究,分析了孔隙水对孔壁的作用。后来对冻融循环机理的研究又出现了充水系数理论、临界水饱和

度理论、微冰晶模型等。国内慕儒等^[4]通过结冰压、渗透压、最不利饱水度和微冰晶模型理论研究了混凝土冻融循环条件下水分迁移和损伤机理;杨全兵^[5]探讨了不同浓度盐溶液冻融循环条件下混凝土内部饱水度、溶液结冰膨胀率,证实了中低盐浓度会引起混凝土内部产生最大结冰压。以上这些假说和理论均为混凝土冻融破坏机理的研究奠定了基础。

目前,混凝土抗盐冻性能的研究工作主要集中在混凝土配制技术、抗冻机理、试验方法和模型建立等方面。其中配制技术主要包括矿物掺合料的掺入和含气量的控制,研究结果^[6-8]表明,粉煤灰代替部分水泥,可以降低工程造价并改善混凝土性能,含气

基金项目:国家自然科学基金(51308112);江苏省交通厅科研项目(2010Y31)

作者简介:闫西乐(1989—),女,硕士研究生,主要从事水泥基材料无损检测及缺陷表征研究。E-mail:yanxifang@163.com

通信作者:张萍(1980—),女,工程师,博士,主要从事材料无损检测及缺陷表征研究。E-mail:zhangpingseu@163.com

量是影响混凝土抗盐冻性能的主要因素,而引气技术的使用是提高混凝土抗盐冻性能的主要措施。由于各研究者试验方法和研究重点不同,混凝土的抗盐冻性能与含气量、强度等级及矿物掺合料的定量关系仍在探索中;试验方法的研究主要集中于孔结构测试及冻融试验评价方法等^[9-10]。

参考已有研究成果,基于实际需求,本文依据GBJ/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》中的快冻法对不同配合比混凝土抗盐冻性能进行研究,考察不同强度等级(C35、C50)、矿物掺合料掺量、新拌混凝土含气量等因素对混凝土抗盐冻性能的影响,通过混凝土外观、表面剥落量、相对动弹性模量随盐冻循环次数变化规律的分析,综合评价不同影响因素之间的相对关系,为实际工程中设计具有高抗盐冻性能的混凝土结构提供参考。

1 原材料和试验方法

1.1 试验原材料

水泥为P·II42.5R;粉煤灰为I级低钙型;矿渣粉为S95级磨细矿渣;骨料采用细度模数为2.6的河砂和粒径5~25 mm连续级配的石灰岩碎石;减水剂为PCA型聚羧酸高性能减水剂,减水率为35%;引气剂为GYQ型高效引气剂;水为普通自来水。

1.2 试验配合比

考虑道桥工程中常用的混凝土,试验设计了C35与C50两种强度等级的混凝土,坍落度为(180±20)mm,所设计的6组试验配合比见表1。

依据GB/T 50080—2002《普通混凝土拌合物性能试验方法》测试混凝土拌合物的性能,装模成型后标准养护至规定龄期,依据GB/T 50081—2002

《普通混凝土力学性能试验方法》测试不同龄期混凝土的抗压强度和60 d龄期的抗折强度。

1.3 试验方法

冻融介质选用质量分数为3.5%的NaCl溶液。试件质量变化采用感量0.1 g的电子天平测定,剥落量采用感量0.01 g的电子天平测定,动弹性模量变化采用NM-4B型非金属超声波检测分析仪测定。新拌混凝土含气量采用直读式LC-615型含气量测定仪测定,硬化混凝土气泡特征参数采用MIC-840-01型硬化混凝土气孔分析仪测定,包括硬化混凝土含气量、平均气泡直径、气泡比表面积、气泡间距系数等参数。

2 结果与分析

2.1 混凝土力学性能

按表1的配合比制备混凝土试件,测试了混凝土不同龄期的抗压强度、动弹性模量、抗折强度以及劈拉强度,结果见表2。由表2可以看出,矿物掺合料的掺加以及引气剂的使用都会降低混凝土抗压强度;与此同时,混凝土折压比有所提高。综合来讲,在满足混凝土强度等级的前提下,对于以抗弯拉为主要受力指标的路面混凝土或者其他混凝土结构构件,使用引气剂提高混凝土折压比将提高混凝土强度利用率。

2.2 硬化混凝土气泡结构分析

Powers^[11]1945年首次提出了气泡间距系数这一概念,并且根据静水压理论模型计算出临界气泡间距系数约为250 μm。当气泡间距系数小于这一值时,混凝土具有较好的抗冻性。Pigeon等^[12]认为用气泡间距系数来衡量混凝土抗冻性的最大优点在于可以通过少量次数的加速冻融循环作用或者直接

表 1 混凝土试验配合比

编号	水胶比	砂率/%	水泥/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	矿粉/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	石/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ (kg·m ⁻³)	引气剂/ 10 ⁻⁴	含气量/%
C35-0-4	0.42	37	370			672	1145	2.96	0.25	4.0
C35-2-2	0.42	38	282	37	56	699	1141	3.00		2.0
C35-2-4	0.39	34	291	39	58	644	1145	3.11	0.19	4.5
C35-2-6	0.39	36	291	39	58	644	1145	3.11	0.25	6.3
C50-0-2	0.32	36	457			645	1148	3.64		2.0
C50-2-4	0.38	34	357	48	71	591	1152	4.14	0.20	3.0

注:引气剂掺量(质量分数)以胶凝材料总量为基准计算。

表 2 混凝土力学性能

编号	抗压强度/MPa			60 d 抗折强度/ 60 d 劈拉强度/		动弹性模量/GPa				
	7 d	28 d	60 d	MPa	MPa	3 d	7 d	14 d	28 d	60 d
C35-0-4	41.20	47.47	53.02	5.91	4.63	45.13	47.58	48.81	48.38	48.84
C35-2-2	45.90	55.76	57.40	6.69	5.24	44.98	48.61	50.70	50.32	51.41
C35-2-4	40.50	51.18	54.39	6.29	4.37	43.36	48.12	48.96	50.60	50.71
C35-2-6	37.30	42.92	48.70	5.60	4.22	40.49	42.28	45.07	45.42	46.00
C50-0-2	58.50	66.09	67.12	7.63	5.01	48.53	52.06	51.49	53.55	53.79
C50-2-4	51.40	60.67	65.85	6.66	4.72	46.13	47.48	48.18	50.21	51.09

测定硬化混凝土气泡间距系数,来快速评价混凝土的抗冻性能,因而可以大大降低工程造价,并且评价结果可靠性很高。

按表 1 的配合比制备混凝土试件,标准养护 60 d,分别测试 6 组硬化混凝土气泡特征参数,结果见表 3。由于新拌混凝土在振捣、静置、养护过程中存在含气量经时损失,并且密闭微小的气孔相互连通成为大气孔,造成硬化混凝土气泡结构变差,因此硬化混凝土含气量往往低于新拌混凝土含气量。新拌混凝土含气量在控制混凝土配合比设计中是一重要指标,而混凝土抗冻性能的优劣取决于硬化混凝土气泡间距系数、平均气泡直径以及气泡比表面积等参数。

表 3 硬化混凝土气泡特征参数

编号	含气量/%		平均气泡直径/ μm	气泡比表面积/ $(\mu\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}^{-3})$	气泡间距系数/ μm
	新拌混凝土	硬化混凝土			
C35-0-4	4.0	3.9	119.9	0.025	195.6
C35-2-2	2.0	1.5	245.4	0.016	267.1
C35-2-4	4.5	3.7	173.3	0.020	243.6
C35-2-6	6.3	5.8	153.6	0.032	231.3
C50-0-2	2.0	1.4	260.6	0.015	273.6
C50-2-4	3.0	2.5	230.3	0.017	256.1

硬化混凝土含气量与新拌混凝土含气量有较好的相关性。对比 C35-0-4 与 C35-2-4 两组混凝土气泡特征参数,其硬化混凝土含气量相差 0.2%,但其气泡间距系数相差 48.0 μm ;矿物掺合料的掺加或水胶比的降低使得硬化混凝土含气量降低,平均气泡直径增大,气泡比表面积减小,气泡间距系数变大。从 C35-2-2、C35-2-4 和 C35-2-6 这 3 组硬化混凝土气泡特征参数可以看出:含气量增大,气泡间距系数依次减小,并且减小趋势随含气量增大而变得平缓。

2.3 混凝土抗盐冻性能

2.3.1 矿物掺合料与气泡参数对混凝土抗盐冻性能的影响

将按表 1 配合比制备的抗冻性试件标准养护 60 d,置于盐溶液中进行快速冻融试验。保持新拌混凝土含气量为 4%,强度等级为 C35 不变,双掺粉煤灰和矿渣粉组(C35-2-4)与基准组(C35-0-4)相对比,其累积剥落量和相对动弹性模量随冻融循环次数的变化规律如图 1 和图 2 所示。可以看出,在盐溶液中冻融循环 150 次后,两组混凝土的相对动弹性模量依然保持 90% 以上,但双掺粉煤灰与矿渣粉使得混凝土抗冻性能有所降低。其原因是掺合料的添加导致所引入的气泡稳定性变差,降低了混凝土的引入气泡质量。C35-0-4 组在盐冻过程中累积剥落量均小于 C35-2-4 组,而其动弹性模量保持率均大于 C35-2-4 组。这是由于 C35-0-4 组硬化混凝土中气泡更加微小,排列更加紧密,更有利于抵抗盐冻

破坏作用。

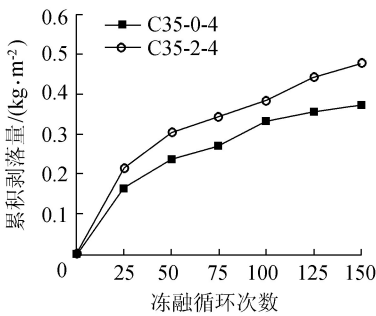


图 1 掺合料添加与否累积剥落量随冻融循环次数变化规律

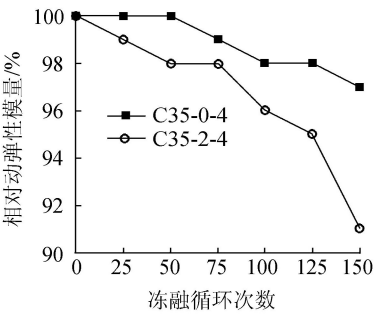


图 2 掺合料添加与否相对动弹性模量随冻融循环次数变化规律

2.3.2 强度与气泡参数对混凝土抗盐冻性能的影响

保持新拌混凝土含气量 3% ~ 4% 及掺合料类型不变,对不同强度等级的混凝土进行盐溶液环境下的快速冻融试验,其累积剥落量和相对动弹性模量变化规律如图 3 和图 4 所示。

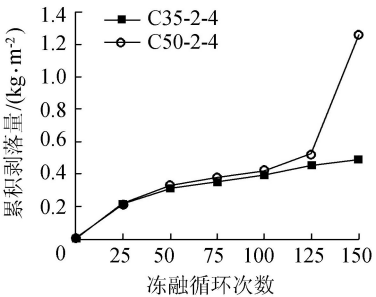


图 3 不同强度试件累积剥落量随冻融循环次数变化规律

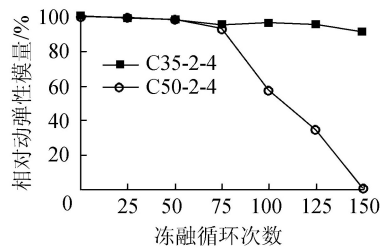


图 4 不同强度试件相对动弹性模量随冻融循环次数变化规律

由表 3 可知,C35-2-4 组气泡间距系数比 C50-2-4 组气泡间距系数小 12.5 μm 。气泡间距系数越小,

密闭气孔更能缓冲冻融过程中的破坏应力,从而改善混凝土抗冻融性能。由表3可见,C50-2-4组所含的气泡质量较C35-2-4组要差,含气量减小1.2%,从而在冻融循环过程中,75次循环时C50-2-4组出现裂缝,动弹性模量急剧下降到60%以下,裂缝的出现加速了冻融损伤速度,使得腐蚀介质更容易进入试件内部,加速内部裂缝产生;在150次冻融循环时,C50-2-4组试件出现大面积缺角、剥落、石子裸露等现象,超声波采集困难。而C35-2-4组试件外观基本没有过多破损,动弹性模量保持率仍在90%以上。

2.3.3 含气量对混凝土抗盐冻性能的影响

为了研究含气量对混凝土抗盐冻性能的影响,按表1配制了3组强度等级和掺合料相同、含气量不同的混凝土。随着引气量的增加,C35-2-2、C35-2-4和C35-2-6组混凝土气泡间距系数依次减小,由大于250.0 μm减小到231.6 μm(表3)。可见,含气量在合适的范围内,随着引气量的增加,硬化混凝土中的微小密闭的气泡增多,将大大改善混凝土抗盐冻性能。经过150次冻融循环后,其累积剥落量和相对动弹性模量变化分别如图5和图6所示。

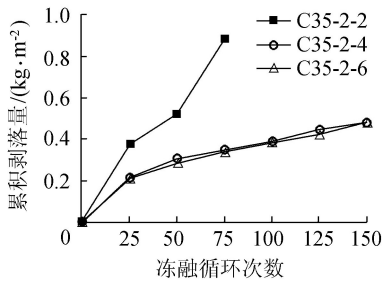


图5 不同含气量试件累积剥落量随冻融循环次数变化规律

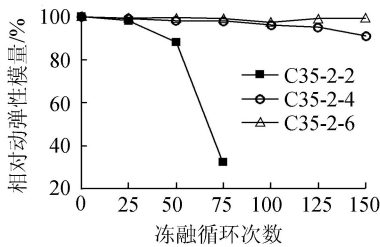


图6 不同含气量试件相对动弹性模量随冻融循环次数变化规律

由图5和图6可见,含气量为2.0%的混凝土经50次冻融循环后,累积剥落量已大于0.5 kg/m²,试件表面开始出现裂缝,75次冻融循环后,试件表面出现大量的石子裸露现象,裂缝增多,超声波采集变得困难,其相对动弹性模量保持率仅有32%;含气量为4.5%和6.3%的混凝土,经150次冻融循环后,累积剥落量仍然小于0.5 kg/m²,外观基本保持完整,相对动弹性模量保持率分别为91%和99%。盐冻过程中,试件损坏程度C35-2-2组最大、C35-2-4

组居中、C35-2-6组最小。由此可见,对于中低强度的混凝土,引气技术是提高其抗盐冻性能的有效手段。

3 结 论

a. 单纯提高强度等级并不一定利于混凝土抗盐冻性能改善,含气量是影响混凝土抗盐冻性能的决定性因素,随着含气量的增大,混凝土的抗盐冻性能提高。

b. 粉煤灰和矿渣粉的掺入会使得混凝土含气量降低和气泡间距系数增大,从而导致混凝土的抗盐冻性能有所降低。

c. 验证了气泡间距系数与混凝土抗盐冻破坏能力有较好的相关性;仅仅使用新拌混凝土的含气量并不足以完全反映混凝土硬化后的气泡结构和特征,进行抗冻混凝土配合比设计时可采用含气量和气泡间距系数双参数来保证其抗盐冻性能。

参考文献:

[1] 段桂珍,方从启. 混凝土冻融破坏研究进展与新思考[J]. 混凝土,2013(5):16-20. (DUAN Guizhen, FANG Congqi. Research progress and newthinking of destruction of concrete due to freeze-thaw cycles[J]. Concrete, 2013(5): 16-20. (in Chinese))

[2] POWERS T C. Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete[J]. ACI Jouna, 1954, 50(9): 741-760.

[3] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened Portland cement paste during freezing[J]. Proceedings Highway Research Board, 1953, 32: 285-297.

[4] MU Ru, TIAN Wenling, ZHOU Mingjie. Moisture migration in concrete exposed to freeze-thaw cycles[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(9): 1713-1717.

[5] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理(Ⅱ):冻融饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 741-745. (YANG Quanbing. One of mechanisms on the deicer-frost scaling of concrete(Ⅱ): degree of saturation and ice-formation pressure during freezing-thawing cycles [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 741-745. (in Chinese))

[6] 屈锋,牛荻涛,杨宇曦. 盐冻循环作用下粉煤灰混凝土性能试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(6): 78-82. (QU Feng, NIU Ditao, YANG Yuxi. Experiment study of performance of fly ash fiber concrete under the action of salt frost[J]. Industrial Construction, 2014, 44(6): 78-82. (in Chinese))

[7] CHUNG C W, SHON C S, KIM Y S. Chloride ion diffusivity of fly ash and silica fume concretes exposed to freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(9): 1739-1745. (下转第94页)

- Simulation of fracture reservoirs permeability based on percolation method[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29 (3): 1306-1311. (in Chinese))
 - [41] 郑委, 鲁晓兵, 刘庆杰, 等. 基于双重逾渗模型的裂隙多孔介质连通性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30 (6): 1289-1296. (ZHENG Wei, LU Xiaobing, LIU Qingjie, et al. Study of connectivity of fractured porous media based on dual-percolation model [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (6): 1289-1296. (in Chinese))
 - [42] ROBINSON P C. Connectivity of fracture systems-a percolation theory approach [J]. Journal of Physics A: Mathematical & General, 1983, 16(3): 605-614.
 - [43] KEVIN H, LONG J C S. Analytical expressions for the permeability of random two-dimensional Poisson fracture networks based on regular lattice percolation and equivalent media theories [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1990, 95(13): 21565-21581.
 - [44] 于青春, 武雄, 大西有三. 非连续裂隙网络管状渗流模型及其校正[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1469-1474. (YU Qingchun, WU Xiong, Ohnishi Yuzo. Channel model for fluid flow in discrete fracture network and its modification [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1469-1474. (in Chinese))
 - [45] 黄勇, 周志芳. 岩体渗流模拟的二维随机裂隙网络模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(1): 91-94. (HUANG Yong, ZHOU Zhifang. 2-D stochastic fracture network model for simulation of seepage through fissured rocks [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(1): 91-94. (in Chinese))
 - [46] 何杨, 李康宏, 柴军瑞. 由统计规律模拟生成的岩体裂隙网络的非稳定渗流数值分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(1): 81-86. (HE Yang, LI Kanghong, CHAI Junrui. Numerical analysis of unsteady seepage through fracture network in rock mass simulated by the Monte-Carlo method [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(1): 81-86. (in Chinese))
 - [47] 冯学敏, 陈胜宏. 含复杂裂隙网络岩体渗流特性研究的复合单元法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 918-924. (FENG Xuemin, CHEN Shenghong. Composite element method for seepage characteristics study on rock masses with complicated fracture network [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 918-924. (in Chinese))
 - [48] 朱红光, 谢和平, 易成, 等. 破断岩体裂隙的流体流动特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 657-663. (ZHUN Hongguang, XIE Heping, YI Cheng, et al. Analysis of properties of fluid flow in rock fractures [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (4): 657-663. (in Chinese))
 - [49] 朱红光. 破断岩体裂隙的流体流动特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012: 1-9.
 - [50] 朱红光, 易成, 姜耀东, 等. 裂隙交叉联接对采动岩体中流体流动特性的影响研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(1): 24-28. (ZHUN Hongguang, YI Cheng, JIANG Yaodong, et al. Effect of fractures cross connection on fluid flow characteristics of mining-included rock [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(1): 24-28. (in Chinese))
 - [51] LIU R, JIANG Y, LI B, et al. A fractal model for characterizing fluid flow in fractured rock masses based on randomly distributed rock fracture networks [J]. Computers & Geotechnics, 2015, 65: 45-55.
 - [52] RAYNALD D, PHILIPPE D, OLIVIER B. Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law length distribution: 1. effective connectivity [J]. Water Resources Research, 2001, 37 (8): 2065-2078.
 - [53] DREUZY J R, DAVY P, BOUR O. Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law length distribution: 2. permeability of networks based on lognormal distribution of apertures [J]. Water Resources Research, 2001, 37(8): 2079-2095.
 - [54] DREUZY J R, PICHOT G, POIRRIE B, et al. Synthetic benchmark for modeling flow in 3D fractured media [J]. Computers & Geosciences, 2013, 50(1): 59-71.
(收稿日期: 2015-04-14 编辑: 熊水斌)
- +++++
- (上接第 45 页)
- [8] 蒋林华, 那彬彬, 周晓明, 等. 冻融与碳化交替作用下的混凝土性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32 (4): 33-36. (JIANG Linhua, NA Binbin, ZHOU Xiaoming. Tests for properties of concrete under alternate freeze-thaw and carbonation actions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32 (4): 33-36. (in Chinese))
 - [9] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理(1): 毛细管饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(5): 522-527. (YANG Quanbing. Mechanisms of deicer-frost scaling of concrete (I): capillary-uptake degree of saturation and ice-formation pressure [J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(5): 522-527. (in Chinese))
 - [10] FU Yawei, CAI Liangcai, WU Yonggen. Freeze-thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(7): 3144-3148.
 - [11] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete [J]. Journal of The American Concrete Institute, 1945, 16: 245-272.
 - [12] PIGEON M, LACHANCE M. Critical air void spacing factors for concretes submitted to slow freeze-thaw cycles [J]. American Concrete Institute, 1981, 78: 282-291.
(收稿日期: 2014-10-13 编辑: 熊水斌)