

文章编号: 1000-4750(2015)05-0178-06

玄武岩纤维混凝土腐蚀条件下 抗冻融性能试验研究

金生吉, 李忠良, 张 健, 王艳苓

(沈阳工业大学土木工程系, 沈阳 110870)

摘 要: 为了研究玄武岩纤维增强混凝土(BFRC)工程应用的耐久性能, 通过试验的方法开展了这种新型复合建筑材料在腐蚀条件下抗冻融性能研究。试验分别测试了玄武岩纤维增强混凝土在无腐蚀环境下、在 5%NaCl 溶液、5%MgSO₄ 溶液和复合溶液(5%MgCl₂ + 5%Na₂SO₄)中的抗冻融寿命。试验结果表明: 在上述四种情况下, 复合材料经过冻融循环时相对弹性模量下降速度依次减缓。结论: 玄武岩纤维对混凝土在腐蚀条件下抗冻融破坏能力增强效果显著, 有效地延长了混凝土在腐蚀条件下的使用寿命。

关键词: 玄武岩纤维增强混凝土; 试验研究; 抗冻融性能; 相对弹性模量; 质量损失

中图分类号: TU502 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.04.0265

EXPERIMENTAL STUDY ON ANTI-FREEZING AND THAWING PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE OF BASALT FIBER UNDER CORROSION CONDITION

JIN Sheng-ji, LI Zhong-liang, ZHANG Jian, WANG Yan-ling

(Department of Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Basalt fiber reinforced concrete (BFRC) is a kind of new composite building materials. In order to study its engineering durability, the freeze-thaw performance of this new composite building material under corrosion-resistance conditions can be studied by experimental method. Tests were respectively carried out for the concrete life reinforced by anti-freeze-thaw basalt fiber in a non-corrosive environment, at 5% NaCl solution, 5% MgSO₄ solution and complex solution (5% MgCl₂ + 5% Na₂SO₄). The results showed that: in above four cases, when the composite material experienced freeze-thaw cycles, the speed of elastic modulus would become lower in turn. Conclusions: Basalt fiber can significantly enhance the ability of freeze-thaw damage of concrete corrosion under freeze-thaw conditions and extend the cyclic lifespan of freeze-thaw concrete under corrosion resistance conditions.

Key words: basalt fiber reinforced concrete; experimental study; freezing-thawing resisting performance; relative dynamic elastic modulus; quality loss

尽管普通水泥混凝土被广泛应用于道路桥梁及建筑等几乎所有土木工程领域, 但是其本身因抗拉、抗折强度低、收缩开裂、韧性低、抗冲击性能

差等缺点, 使其在工程应用中受到一定限制^[1]。如何改善普通水泥混凝土性能并克服其弊病, 一直是研究人员长期以来不断探索追寻的问题。到目前,

收稿日期: 2014-04-01; 修改日期: 2014-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272216); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LJQ2013016)

通讯作者: 金生吉(1973—), 男, 辽宁康平人, 副教授, 工学博士(后), 系主任, 主要从事工程结构稳定和建筑材料性能研究(E-mail: shengjijin@sina.com).

作者简介: 李忠良(1986—), 男, 辽宁大连人, 硕士生, 主要从事建筑材料性能及工程应用研究(E-mail: nolzhongliang521@126.com);

张 健(1990—), 男, 河北唐山人, 硕士生, 主要从事玄武岩混凝土性能及工程应用研究(E-mail: 2380916329@qq.com);

王艳苓(1989—), 女, 辽宁锦州人, 硕士生, 主要从事玄武岩混凝土性能研究(E-mail: colorful.53719.com@qq.com).

通过将纤维加入到普通混凝土中，以改良混凝土的各种性能的研究成为新型符合建筑材料研究的热点。由于纤维的掺入，使素混凝土原有的韧性、抗冲击性、耐久性能有明显提高，砂浆塑性开裂性能也得到了明显抑阻。掺入纤维后，纤维增强混凝土的强度韧性和抑制裂缝开展的能力主要受到纤维本身的力学性能、纤维与基体的粘结性能以及纤维的数量和其在基体中的分布情况的影响^[2]。作为近年新兴的材料，连续玄武岩纤维由于其优越的性能而备受关注。连续玄武岩纤维(Continuous Basalt Fiber, 简称 CBF)是一种外观呈金褐色的无机纤维材料，制作方法是将纯天然火山喷出岩作为原料，利用铂铑合金拔丝漏板将原料在 1450℃~1500℃高温下熔融后快速拉拔而成^[3]。CBF 具有着优越的力学性能，并具有耐高温、耐酸碱、价格低廉、取材及生产过程环保等优点，逐渐成为混凝土增强领域的新兴材料，以玄武岩纤维为加强体制成的纤维混凝土的力学和耐久性能是目前研究的热点^[4-9]。本文针对玄武岩纤维增强混凝土耐久性能中的抗冻融性能开展了试验研究，并得出有益的结论。

1 试验准备

1.1 试验材料

选用 150mm×150mm×150mm 的立方体试件。制备试件所用的原材料包括水、PSA32.5 矿渣硅酸盐水泥、细骨料(细度模数是 2.68 的天然中河砂)、粗骨料(粒径为 5mm~31mm 的普通碎石)、外加剂(高性能聚羧酸减水剂, 1%)和玄武岩纤维(CBF)。纤维采用短切 CBF，密度为 2650kg/m³，生产厂家为辽宁阜新金石有限公司，CBF 相关技术指标详见表 1，CBF 样品如图 1 所示。

表 1 CBF 性能指标参数

Table 1 CBF performance parameters

直径/ μm	长度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限延伸率/(%)
13	18	4550	105	3.2



图 1 试验用 CBF 样品

Fig.1 Test samples of CBF

1.2 试验混凝土配合比设计

混凝土的配合比是工程建设施工生产中最关键的步骤之一，直接影响工程质量。本试验采用 C30 混凝土强度等级进行混凝土的配合比设计，见表 2。

表 2 普通混凝土配合比 /(kg/m^3)

Table 2 Common concrete mixture ratio

水泥	砂	石子	水	减水剂	总重	水灰比
460	543	1209	189	1.38	2402.38	0.41

以此配合比为基础设计普通混凝土(PC)和玄武岩纤维增强混凝土(BFRC)，其中 CBF 的体积掺量分别为 0.1%、0.2%、0.3%，即用密度折合成掺量为 2.65kg/m³、5.3kg/m³、7.95kg/m³。

1.3 试件制作及养护

抗冻融性能试验试件的尺寸、数量、CBF 体积掺量参见表 3。

表 3 试件参数表

Table 3 Schedule of test specimen parameters

试件类型	试件尺寸/mm	数量	CBF 体积百分率/(%)	CBF 掺量/(kg/m^3)
PC	100×100×400	6	0.0	0
BFRC1	100×100×400	6	0.1	2.65
BFRC2	100×100×400	6	0.2	5.30
BFRC3	100×100×400	6	0.3	7.95

试件材料准备和制作过程工序如图 2 所示。

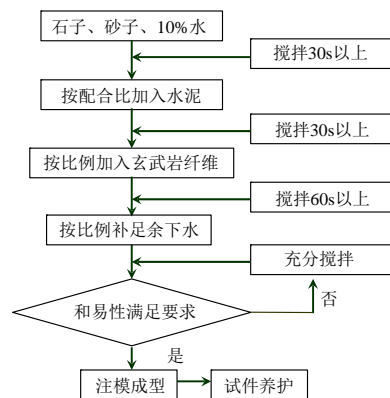


图 2 试件制作流程图

Fig.2 Specimen production flow chart

试验试件的制作全过程在控制试验室内进行，温度 23℃±5℃，湿度控制在 50% 以上。试件成型后在室内放置一到两昼夜，然后把试件记录编号后拆下试模，之后迅速放入室温为 20℃±2℃，相对湿度大于 95% 的养护室养护，试件的养护龄期为 28d。为保证试件内部在冻融时的温度能够达到要求，制作了与冻融试件相同规格的测温时间，将温度传感器插入测温试件的中心，使用的介质为防冻液。

1.4 测试指标确定

采用标准试块的抗压强度代表混凝土结构性能的主要指标之一。当混凝土标准试件的四周表面出现侵蚀剥落,势必导致试件受力面积降低,并伴随试件内部损伤。总之,试件的抗压强度总体随着混凝土四周表面的剥落量的增大而趋于减小^[10]。一般认为抗压强度的损失能够代表试件整体性能下降,而混凝土试件的剥落程度在某种程度上也可以反映试件性能的降低。但用抗压强度的减低量来直接代表混凝土冻融破坏的程度并不科学。

混凝土经过反复的冻融变化,其内部结构必定会由于微观空隙水的冻胀由密变疏松,而指标动弹性模量能够很准确地反映材料的这种性质。由此,本文所采用的试验即是通过测量标准试件的相对动弹性模量(Relative Dynamic Elastic Modulus,即 RDEM)变化来衡量玄武岩纤维混凝土受冻融影响的损伤程度。试件的相对动弹性模量按下式计算:

$$p_i = f_{ni}^2 / f_{oi}^2 \times 100 \quad (1)$$

式中: p_i 为试件经 n 次冻融循环变化后第 i 个玄武岩纤维混凝土试件的相对动弹性模量; f_{ni} 为经 n 次冻融循环变化后第 i 个混凝土试件的横向基频; f_{oi} 为第 i 个混凝土试件横向基频的初始值。

1.5 试验设备

本次进行玄武岩纤维混凝土冻融循环损伤试验所使用的仪器设备主要包括冻融循环试验机和动弹性模量测定仪。单边冻融试验机配有大功率压缩机和温控系统,试验冻融机如图 3 所示。



图 3 冻融试验机

Fig.3 Freeze-thaw testing machine

动弹性模量测定仪采用天津市港源试验仪器厂生产 DT-16 动弹仪,如图 4 所示。



图 4 试件动弹性模量测定

Fig.4 Specimen dynamic elastic modulus measurement

1.6 试验要求

冻融循环试验要求严格控制一次冻融循环周期时间,不低于 2h,同时融化的时间应大于冻融循环周期的 25%;控制试件在冻融循环过程的温度,上限为 $5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 内,下限为 $-18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,无论何时,试件中心温度上限控制为 7°C ,下限为 -20°C ;冷冻和融化之间的转换时间不宜超过 10min。冻融循环试验在满足以下三个条件之一时停止试验:1) 冻融循环次数达到 300 次;2) 相对动弹性模量 p_i 下降至 60%;3) 质量损失率 $\varepsilon = 5\%$ 。

2 5%NaCl 溶液腐蚀下抗冻融试验

氯盐腐蚀是混凝土结构最常见的腐蚀方式之一,采用 5%NaCl 溶液浸泡来模拟氯盐腐蚀环境^[11-13]。试验采用的混凝土试件的 CBF 体积掺量分别为 0%、0.1%、0.2%、0.3%,4 组试件进行对比试验,研究 BFRC 在腐蚀条件下的冻融损伤失效过程以及 CBF 对混凝土损伤的抑制作用。在混凝土的失效过程中,由于 BFRC 在腐蚀条件下不可避免受到侵蚀并产生质量损失,而 CBF 对于混凝土质量损失的抑制不如对其动弹性模量变化的抑制,因此,主要从混凝土动弹性模量变化和冻融循环寿命的角度研究 CBF 对于混凝土在腐蚀条件下的抗冻融性能。

BFRC 混凝土在 5%NaCl 溶液腐蚀条件下冻融循环的相对动弹性模量变化过程和抗冻融循环次数关系曲线如图 5 所示。

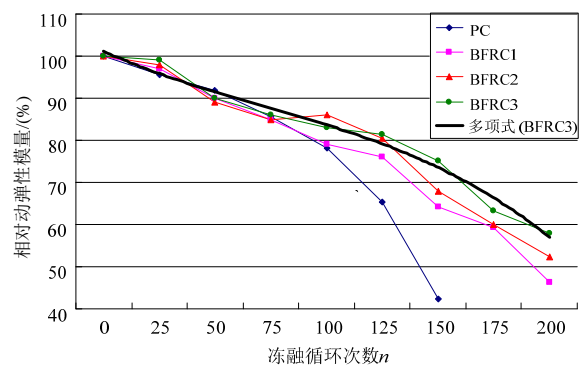


图 5 相对动弹性模量与冻融循环次数的关系

Fig.5 Relationship curve between relative dynamic elastic modulus with freeze-thaw cycles

从图 5 可以明显看出,混凝土的相对动弹性模量因冻融循环次数增加而下降,且随着 CBF 体积掺量增加,BFRC 的相对动弹性模量下降曲线趋于平缓,也就是说 CBF 能够抑制混凝土在 5%NaCl

溶液腐蚀条件下的抗冻性能,且当 CBF 体积掺量为 0.3% 时,混凝土的相对动弹性模量下降最少,但是三种体积掺量的 BFRC 在初期抗冻融性能差距较小。素混凝土在第 150 次循环时动弹性模量下降到 60% 以下, BFRC 在 200 次冻融循环以后相对动弹性模量将下降至 60% 以下。采用内插法可以计算出来, PC、BFRC1、BFRC2、BFRC3 分别经过 131 次、172 次、176 次、191 次冻融循环,混凝土达到冻融破坏标准。

CBF 体积掺量为 0.3% 的 BFRC3 抗冻融损伤效果最好,因此进行 BFRC3 在 5%NaCl 溶液腐蚀条件下相对动弹性模量与冻融循环次数关系的回归分析,探索冻融寿命与相对动弹性模量的变化规律和趋势,采用乘幂、对数、指数、线性 and 多项式进行拟合,经比较三次多项式的拟合优度最高, $R^2=0.9795$,其回归公式为:

$$E_n = -0.087x^3 + 1.0181x^2 - 7.7829x + 108.01 \quad (2)$$

因此,可由式(2)计算玄武岩纤维增强混凝土在相类似的腐蚀条件下,根据工程使用年限推算相对动弹性模量,并由此来评价工程材料和结构的所处的安全状态。

3 5% $MgSO_4$ 溶液腐蚀下抗冻融试验

在我国西北盐碱地带,硫酸盐腐蚀是最普遍的侵蚀作用之一,而硫酸盐侵蚀往往较其他侵蚀更为严重,参考大量硫酸盐侵蚀试验的文献,试验选取 5% 硫酸镁溶液作为侵蚀介质,来模拟硫酸盐腐蚀环境进行复合材料抗冻性试验^[14]。

BFRC 混凝土在 5% $MgSO_4$ 溶液腐蚀条件下冻融循环的相对动弹性模量变化过程和抗冻融循环次数如图 6 所示。

由图 6 可以发现如下规律:随着冻融循环次数 n 的不断增加,玄武岩纤维混凝土的相对动弹性模量随之下降;从相对动弹性模量变化曲线变化趋势上来看,在 5% $MgSO_4$ 溶液腐蚀下与无腐蚀环境下相比,冻融对玄武岩纤维混凝土相对动弹性模量影响降低。当经过 175 次冻融循环后,5% $MgSO_4$ 溶液腐蚀条件冻融循环作用下混凝土的相对动弹性模量下降曲线开始加速下降。由此表明 5% $MgSO_4$ 溶液减缓了混凝土的冻融损伤与失效速度,提高了混凝土的抗冻性能。根据回归曲线可以得出结论:

素混凝土、BFRC1、BFRC2、BFRC3 分别经过 232 次、256 次、272 次、278 次冻融循环后,相对动弹性模量下降到 60%,该结果均高于混凝土冻融破坏标准。

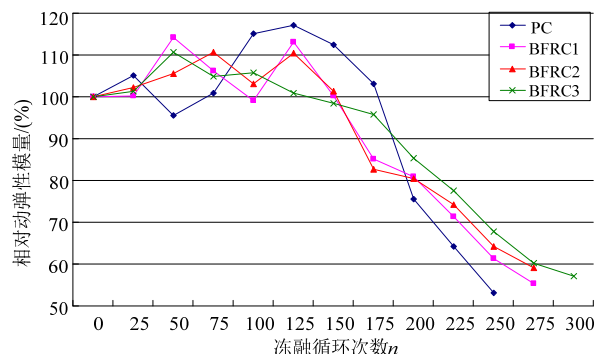


图 6 相对动弹性模量与冻融循环次数的关系

Fig.6 Relationship curve between relative dynamic elastic modulus with freeze-thaw cycles

究其原因,因硫酸盐相对氯盐有着更好的降低冰点的作用,其对混凝土的破坏损伤主要体现在硫酸盐对混凝土的侵蚀方面,而加了 CBF 置换了一部分混凝土, CBF 本身有着极强的耐酸碱性能,当混凝土表层开始剥落的时候, CBF 则牢牢的连接着周围的混凝土,使得周围结构不致因为受到侵蚀而变得疏松,依然保持致密的状态。因此,随着 CBF 体积掺量的增加,混凝土的动弹性模量变化下降趋势趋于平缓,抗冻融性能也有所提升。

4 BFRC 在复合溶液中抗冻融试验

在实际工程当中,如矿区地下水、盐碱地区、沿海地区、海港码头等,均是多种离子共存(主要腐蚀离子为 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})。试验参照硫酸盐和除冰盐侵蚀试验的相关文献,采用质量浓度为 5.0% 的 $MgCl_2$ 溶液和质量浓度为 5.0% 的 Na_2SO_4 溶液,来模拟玄武岩纤维增强混凝土在复杂的侵蚀环境下的抗冻融性能变化规律^[15]。

通过实验测试,得到玄武岩纤维增强混凝土这种新型复合建筑材料在(5% $MgCl_2$ +5% Na_2SO_4)复合溶液腐蚀条件下的相对动弹性模量变化过程和抗冻融循环次数关系曲线如图 7 所示。

由图 7 的相对动弹性模量随冻融循环变化曲线可以发现规律:标准混凝土试件相对动弹性模量随着冻融循环次数的不断增加而随之下降,复合材料

在(5% $MgCl_2$ +5% Na_2SO_4)复合溶液中冻融环境下,相对动弹性模量下降比较平缓。由此表明复合溶液能延缓混凝土的冻融损伤时间。采用内插法可以计算玄武岩纤维混凝土经过 400 次冻融循环,其相对动弹性模量仍然没有下降到 60% 以下。

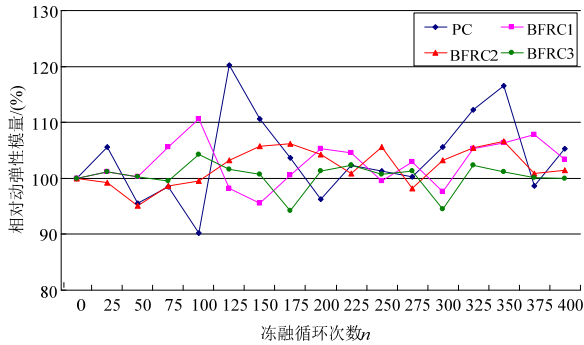


图7 相对动弹性模量与冻融循环次数的关系

Fig.7 Relationship curve between relative dynamic elastic modulus with freeze-thaw cycles

通过分析 BFRC 冻融损伤抑制作用原理可知,氯化镁和硫酸钠的综合作用正结合了氯盐和硫酸盐的优势,既能降低冰点,又能因为混凝土在冻融时的低温阻止了氯离子、镁离子等的迁移,混凝土内部结构被腐蚀向疏松变化的过程变缓,因此混凝土的动弹性模量降低速度缓慢,冻融寿命长,能够承受达到 400 次以上的冻融循环作用。掺入了 CBF 之后,由于 CBF 极强的耐化学腐蚀性能,在复合盐溶液腐蚀条件下,CBF 不会发生较大的变质腐蚀变化,因此相对于初始在混凝土中的成分没有发生变化。所以 BFRC 的相对动弹性模量、冻融循环次数和未掺入 CBF 的素混凝土几乎一致,但是由于 CBF 的掺入,随着 CBF 体积掺量增多,混凝土内部被腐蚀的概率小,动弹性模量变化趋于稳定,因此 BFRC 的动弹性模量变化更加平稳,CBF 能够有效抑制混凝土的冻融损伤。

5 结论

本文开展了玄武岩纤维增强混凝土的工程应用耐久性的试验研究,对比分析了材料在不同腐蚀条件下抗冻融性能,得到以下结论:

(1) 玄武岩纤维混因为有着极强的耐酸碱腐蚀的特点,分布在混凝土中不会因为盐溶液的腐蚀而发生质的变化,因而腐蚀环境下继续可以起到很好的承托骨架和连接纽带作用,将周围的混凝土紧紧握裹在一起,减缓了混凝土内部由密实到疏松的变化过程,减缓了混凝土冻融循环时相对动弹性模量

的降低,使混凝土抗冻融破坏的能力有所增强,混凝土在腐蚀条件下受冻融影响降低。

(2) 试验结果表明玄武岩纤维混凝土的相对动弹性模量因冻融循环次数增加而趋于降低,且随着纤维的体积掺量增加下降速率趋于平缓。0.1%、0.2%和 0.3% 三种体积掺量的 BFRC 在初期抗冻融性能差距较小,而经历 75 次循环之后出现了明显的差异,分别经过 172 次、176 次、191 次冻融循环后,相应的相对动弹性模量下降至 60%,该结果均高于冻融破坏标准。

(3) 根据对玄武岩纤维混凝土在腐蚀环境下的抗冻融损伤试验结果进行回归分析,可以提出拟合度较高的相对动弹性模量与冻融循环次数的关系式。可将该式作为在相似腐蚀条件下,评价工程材料所处的安全状态的一个指标关系式。

(4) 混凝土在盐类溶液腐蚀条件下的冻融破坏主要体现被盐类侵蚀的表层剥落方面,初始阶段可能会出现由于表面裂纹吸水饱和或吸附盐类而导致的质量增加的情况;但随着冻融循环次数的增加,腐蚀程度逐渐加重,表层层状剥落愈加明显。

参考文献:

- [1] 何松华, 赵碧华, 刘永胜. 纤维混凝土技术的研究新进展[J]. 商品混凝土, 2009, 3: 49—51.
He Songhua, Zhao Bihua, Liu Yongsheng. The new research progress of fiber-reinforced concrete technology [J]. Ready-mixed Concrete, 2009, 3: 49—51. (in Chinese)
- [2] Jin Shengji, Liu Zixin, Li Zhongliang, et al. Yanling. Research on applied of CBF composite material in engineering [C]. 2nd Global Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering. Shenzhen the American Society of Civil Engineers, 2013: 137—141.
- [3] 姜雪洁, 王书祥. 纤维混凝土耐久性试验及机理分析[J]. 建筑技术, 2005, 36(1): 41—42.
Jiang Xuejie, Wang Shuxiang. Test and mechanism analysis on durability of fiber concrete [J]. Architecture Technology, 2005, 36(1): 41—42. (in Chinese)
- [4] Czigany T, Poloskei K, Karger-Kocsis J. Fracture and failure behavior of basalt fiber mat-reinforced vinyl ester/epoxy hybrid resins as a function of resin composition and fiber surface treatment [J]. Journal of Materials Science 2005, 40(2): 128—138.
- [5] Hamidreza R, Hossein S J. The bam (Iran) earthquake of December 26, 2003: From an engineering and seismological point of view [J]. Journal of Asian Earth Science, 2006, 27(5): 576—584.

- [6] 许金余, 李为民, 黄小明, 等. 玄武岩纤维增强地质聚合物混凝土的动态本构模型[J]. 工程力学, 2010, 27(4): 111—117.
Xu Jinyu, Li Weimin, Huang Xiaoming, et al. Dynamic constitutive model of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(4): 111—117. (in Chinese)
- [7] 王明超, 张佐光, 孙志杰. 连续玄武岩纤维及其复合材料耐腐蚀特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(10): 1255—1258.
Wang Mingchao, Zhang Zuoguang, Sun Zhijie. Corrosion resistance characteristic of continuous basalt fiber and its reinforcing composites [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(10): 1255—1258. (in Chinese)
- [8] 赵中华, 刘晓波, 侯新月, 等. 玄武岩纤维在混凝土中的应用[J]. 低温建筑技术, 2011, 7: 5—6.
Zhao Zhonghua, Liu Xiaobo, Hou Xinyue, et al. Application of basalt fiber in concrete [J]. Low Temperature Construction Technology, 2011, 7: 5—6. (in Chinese)
- [9] 李为民, 许金余. 玄武岩纤维混凝土的冲击力学行为及本构模型[J]. 工程力学, 2009, 26(1): 86—91.
Li Weimin, Xu Jinyu. Dynamic behavior and constitutive model of basalt fiber reinforced concrete under impact loading [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1): 86—91. (in Chinese)
- [10] Dias D P, Thaumaturgo C. Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(1): 49—54.
- [11] Zielinski, Krzysztof, Olszewski, et al. The impact of basaltic fibre on selected physical and mechanical properties of cement mortar [J]. Concrete Precast Plant Techno, 2005, 1: 28—33.
- [12] Nihat Morova. Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 175—180.
- [13] Francisco J. De Caso y Basalo, Fabio Matta, Antonio Nanni. Fiber reinforced cement-based composite system for concrete confinement [J]. Construction and Building Materials, 2012, 32: 55—65.
- [14] 余红发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 引气混凝土在中国盐湖环境中抗冻性的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(3): 15—18.
Yu Hongfa, Sun Wei, Yan Lianghai et al. Research on freezing-thawing durability of air-entrained concrete exposed to salt lakes [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26(3): 15—18. (in Chinese)
- [15] 王玲, 李刚. 纤维混凝土在冻融循环、冻融-氯盐共同作用下的耐久性试验研究[J]. 混凝土, 2002, 12: 43—46.
Wang Ling, Li Gang. Durability of fiber concrete on the action of freezing-thawing cycles and on the simultaneous actions of freezing-thawing cycles and deicing [J]. Concrete, 2002, 12: 43—46. (in Chinese)