

钢纤维混凝土抗冻性能试验研究

牛荻涛, 姜磊, 白敏

(西安建筑科技大学, 土木工程学院, 西安 710055)

摘要:为了研究钢纤维混凝土的抗冻性能,采用快冻法进行了0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%五种不同钢纤维掺量的混凝土在水中和3.5%氯化钠溶液中冻融试验。通过分析冻融循环次数和钢纤维体积率对钢纤维混凝土冻融后质量损失、劈裂强度损失和相对动弹性模量变化的影响,分析了冻融环境下钢纤维对混凝土的增强机理。并且用压汞法和SEM从微观上研究了钢纤维混凝土的孔径分布特征,讨论了微观结构对其抗冻性能的影响。研究表明,在冻融循环作用下掺入适量的钢纤维能够减小混凝土内部的孔隙率、增加密实度,有效阻止混凝土内部微裂缝的产生与发展,提高混凝土的抗冻性能。钢纤维掺量对混凝土抗冻性影响显著,掺量为1.5%时,钢纤维对混凝土抗冻性能改善效果最好。

关键词:钢纤维;混凝土;抗冻性能;冻融循环

中图分类号:TU528.572 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2012)04-0080-05

Experimental Analysis on the Frost Resistance of Steel Fiber Reinforced Concrete

NIU Ditao, JIANG Lei, BAI Min

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: The frost resistance of steel-fiber reinforced concrete (SFRC) was studied based on the fast freeze-thaw tests in water and in a 3.5% sodium chloride solution, with different mass fraction of steel fiber in concrete at 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0%, respectively. The effects of the number of freeze-thaw cycles and the volume fraction of steel fiber on the mass lose rate, the splitting strength loss rate and the dynamic modulus of elasticity of SFRC were analyzed. The reinforcement mechanism of the steel fiber under the action of freeze and thaw was also discussed. Moreover, mercury intrusion method and SEM analysis were carried out to study the pore size distribution features and the performance of microstructure on the impact of frost resistance of SFRC. The results show that adding an appropriate amount of steel fiber into concrete can reduce the pore porosity and improve the compactness of concrete. Furthermore, the presence of steel fiber proves to shrink the porosity and improve evidently the frost resistance of concrete. It is also shown that the steel fiber content has a great influence on the frost-resisting property of SFRC. The best performance of SFRC can be achieved when the volume fraction of steel fiber is 1.5%.

Key words: steel fiber; concrete; frost resistance; freeze-thaw cycle

钢纤维混凝土是近年来发展起来的一种性能优良的复合材料。随着钢纤维混凝土在工程中的广泛应用,其耐久性问题将会是十分重要而迫切需要解

决的问题。许多学者对钢纤维混凝土做了大量试验研究,然而多集中于力学性能方面^[1-4],钢纤维对混凝土耐久性影响则研究较少。对于寒冷地区的建筑

收稿日期:2011-06-30

基金项目:国家杰出青年科学基金(50725824);长江学者和创新团队发展计划资助项目

作者简介:牛荻涛(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事混凝土结构耐久性设计研究,(E-mail)niuditao@163.com。

物而言,冻融作用是导致其结构性能损伤的主要原因^[5-7]。冻融循环加剧了混凝土内部初始裂纹扩展并且诱发新裂纹出现和发展,这是混凝土冻融劣化破坏的本质。但是,钢纤维的掺入有效限制了混凝土内部裂纹的形成与扩展,提高了混凝土的抗裂能力。因此,冻害地区钢纤维混凝土耐久性能引起了众多学者的广泛关注。谢晓鹏等^[8]和康晶^[9]研究表明,钢纤维的掺入延缓了混凝土内部裂纹的形成与扩展,增强了混凝土基体的抗冻性能。Yang等^[10]认为钢纤维的掺入降低了混凝土的抗盐冻剥蚀性能,特别是引气混凝土的抗盐冻剥蚀性能。目前,钢纤维混凝土抗冻性能研究的重点主要集中在宏观层面,较少从微观层面对其性能退化规律进行研究,且对盐溶液环境下钢纤维混凝土抗冻性能研究也较少。

本文针对不同掺量的钢纤维混凝土,通过快速冻融试验,从宏观上研究了不同冻融循环次数下钢纤维混凝土质量损失、相对动弹模量变化和劈裂强度损失,并通过压汞和扫描电镜试验微观分析了冻融循环前后混凝土内部微结构变化,分析了钢纤维对混凝土增强作用原理和钢纤维混凝土冻融破坏机理,旨在为冻融环境下钢纤维混凝土耐久性设计提供基础资料。

1 试验概况

1.1 原材料和配合比

试验中所采用的水泥为陕西秦岭水泥股份有限公司生产的秦岭牌 P. O42.5R 普通硅酸盐水泥。

细集料采用普通河砂,细度模数 2.69,表观密度 2.63 g/cm³。粗集料采用 5~16 mm 混合级配碎石。钢纤维采用波浪形剪切钢纤维,长度为 30 mm,长径比为 60,截面形状为矩形。减水剂采用高效减水剂,黄褐色、粉末状。

本次试验中,试验用混凝土的水胶比为 0.45,钢纤维体积率分别为 0%、0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0%。试验用各种混凝土的配合比见表 1。其中

编号 PC 表示钢纤维掺量为零的基准混凝土,SFC 表示掺有钢纤维的混凝土,“-”后面的数字表示钢纤维体积率。

1.2 试验方案

钢纤维混凝土水冻试验依据《钢纤维混凝土试验方法》中的快冻法进行,盐冻试验参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》进行。试件标养 24 d 后,分别在水中和氯化钠溶液中浸泡 4 d,在第 28 d 时进行快速冻融试验。氯化钠溶液采用 3.5% 的浓度,与海水中盐的浓度一致^[11-12]。每冻融循环 25 次,测试试件劈裂强度、相对动弹模量、重量损失情况。

试验中,相对动弹模量和质量损失测量采用 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体,共制备 10 组 30 个试件;劈裂强度测量采用 100 mm×100 mm×100 mm 立方体,共制备 85 组共 255 个试件。

2 试验结果与分析

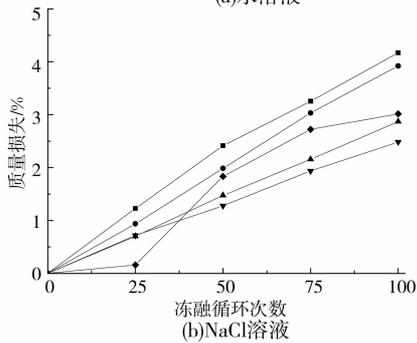
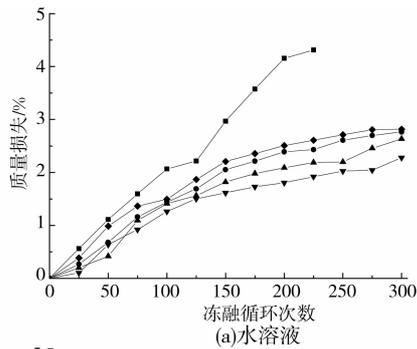
2.1 质量损失率

图 1 为钢纤维混凝土冻融循环后的质量损失。由图 1(a)可见,PC 在冻融循环作用下,质量损失明显,在未到 300 次冻融循环时质量损失超过 5%,达到破坏。钢纤维的掺入对混凝土质量损失率有明显的抑制作用,经过 300 次冻融循环,SFC-1.5 质量损失率只有 2.28%,约为普通混凝土的一半。

但是,从图 1(b)可以看出盐冻循环下的试件质量损失率明显增大,冻融循环 100 次后,PC 的质量损失达 4.2%,接近破坏,SFC-1.5 为 2.5%;与此相对应的水中,PC 和 SFC-1.5 的质量损失仅为 2.1% 和 1.3%,明显小于盐冻循环。由于盐冻破坏的特殊性和严酷性^[13-14],加速了表层混凝土的解体和剥离现象,混凝土中杂乱分布的钢纤维对表层浆体拉接作用有限,因此,钢纤维混凝土在遭受盐冻破坏时,冻融剥落程度加重。

表 1 基准混凝土与钢纤维混凝土配合比

编号	水泥/(kg·m ⁻³)	细集料/(kg·m ⁻³)	粗集料/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	钢纤维/(kg·m ⁻³)	减水剂/%
PC	367	765	1 146	165	0	0.6
SFC-0.5	367	735	1 102	165	39	0.6
SFC-1.0	367	733	1 100	165	78	0.6
SFC-1.5	367	718	1 066	165	117	0.6
SFC-2.0	367	702	1 053	165	156	0.6

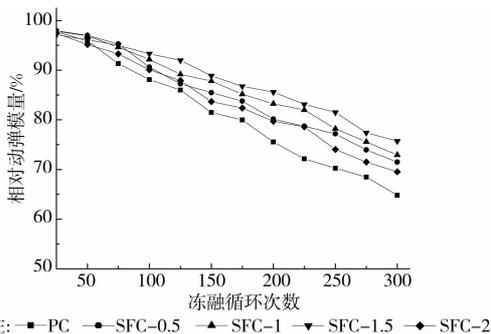


注: ■—PC ●—SFC-0.5 ▲—SFC-1 ▼—SFC-1.5 ◆—SFC-2

图1 钢纤维混凝土在溶液中冻融时的质量损失

2.2 相对动弹性模量的变化

图2为钢纤维混凝土冻融循环后的相对动弹性模量损失。由图可以看出,在300次冻融循环后,PC和SFC-1.5的相对动弹性模量损失分别为35.2%和24.3%,PC接近破坏,而SFC-1.5冻融损伤得到明显抑制。但是当钢纤维掺量达到2.0%时,钢纤维对混凝土的增强作用降低,对抗冻性能影响不明显。总体来看,掺入钢纤维后,抑制了混凝土内部微裂缝或缺陷的不断产生,延缓了相对动弹性模量的下降。



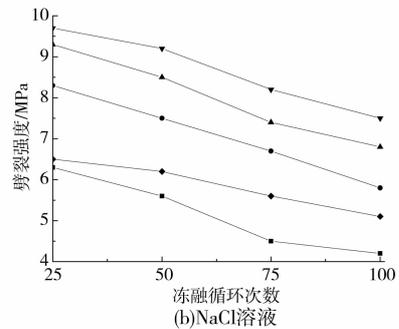
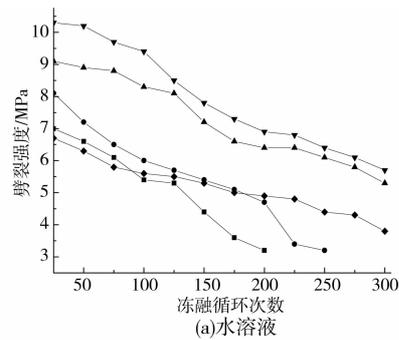
注: ■—PC ●—SFC-0.5 ▲—SFC-1 ▼—SFC-1.5 ◆—SFC-2

图2 钢纤维混凝土在水中冻融时的相对动弹性模量损失

2.3 劈裂强度损失

图3为钢纤维混凝土冻融循环后的劈裂强度损失。从图3(a)可以看出,钢纤维的掺入提高了混凝土的劈裂强度,纤维掺量为1.5%时,劈裂强度最高,约为基准混凝土的2倍。同时,钢纤维还降低了冻融后混凝土劈裂强度下降速率。其中,PC在冻融150次时,劈裂强度降低40%,在冻融200次时,达

到破坏;SFC-1.5在冻融250次时,劈裂强度降低40%,明显优于基准混凝土。从图3(b)可以看出,盐冻循环100次,PC和SFC-1.5劈裂强度分别降低34%和22%;与此相对应的水冻循环中,PC和SFC-1.5分别降低23%和9%,说明盐冻破坏削弱了钢纤维的阻裂增韧作用,加快了混凝土内部损伤,造成劈裂强度快速降低。



注: ■—PC ●—SFC-0.5 ▲—SFC-1 ▼—SFC-1.5 ◆—SFC-2

图3 钢纤维混凝土在溶液中冻融时的劈裂强度损失

3 微观机理分析

3.1 孔结构分析

表2和表3为标准养护28d后,压汞法测试的钢纤维混凝土孔体积和孔径分布情况。由表2可以看出,合理掺量的钢纤维减小了混凝土孔隙率,纤维掺量在0%~1.5%范围内增加时,混凝土总孔隙率、总孔体积和总孔面积分别减少32.13%、28.54%和42.78%,混凝土平均孔径和最可几孔径均有下降。但是,纤维掺量达到2.0%时,钢纤维混凝土孔隙结构参数均有增大现象,孔结构表现出明显劣化。由表3可以看出,纤维掺量从在0%~1.5%范围内增加时,孔径为 $d < 20$ nm、 $20 \text{ nm} \leq d < 50$ nm的孔所占比例增大;孔径为 $50 \text{ nm} \leq d < 200$ nm、 $d \geq 200$ nm的孔所占比例减少。说明混凝土无害和少害孔增多,有害和多害孔减少,孔结构得到改善,有利于提高混凝土的抗冻性能。

3.2 扫描电镜分析

图4和图5是PC和SFC-1.5冻融前后SEM图片,可以看出,冻融前二者的各水化产物互相胶结

形成连续相,整体结构均匀密实,没有微裂缝产生;50次盐冻循环后,二者均出现微裂缝,但是 SFC-1.5 中微裂缝数量明显少于 PC;100次盐冻循环后,PC 中微裂缝扩展加深,并且大部分相互贯通,结构出现明显疏松,而 SFC-1.5 中裂缝数量和贯通程度均小于 PC,没有出现组织疏松。可以看出,钢纤维限制了裂缝的发展与贯通,提高了混凝土的抗冻性能。

在冻融循环过程中,混凝土毛细孔壁同时承受膨胀压力和渗透压力^[15-16],当这两种压力所产生的拉应力超过混凝土抗拉强度时,混凝土开裂,产生微裂缝。钢纤维的弹性模量与强度高于混凝土^[17],而且具有较大变形能力,可以发挥增韧、阻裂作用,从

而减小引发裂缝与促进裂缝开展的冻融破坏力。随着钢纤维掺量增加,混凝土中钢纤维-水泥基体界面数量增多,这些界面是钢纤维混凝土中的薄弱区域。通过 SEM 观察发现,钢纤维-水泥基体界面存在有片状结构的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (图 6) 和簇状结构的钙矾石晶体 (AFt) (图 7)。钙矾石晶体主要存在于微小孔隙中和集料表面,说明钢纤维混凝土界面区存在较大孔隙率和较为疏松的网络结构,从而成为冻融过程中微裂缝产生和发展的敏感区域。冻融循环作用下,在界面过渡区产生的裂缝呈现增多、增宽的趋势(图 8)。所以钢纤维掺量较大的 SFC-2.0 抗冻能力反而降低。

表 2 钢纤维混凝土孔隙结构参数

编号	总孔隙率/%	总孔体积/($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)	总孔面积/($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	临界孔径/nm	平均孔径/nm	最可几孔/nm
PC	15.22	0.078 5	23.63	40.31	52.14	59.37
SFC-0.5	14.17	0.066 4	19.39	20.24	25.85	30.57
SFC-1.0	12.69	0.062 0	17.04	15.73	18.01	21.60
SFC-1.5	10.33	0.056 1	13.52	12.47	13.80	15.23
SFC-2.0	14.60	0.068 1	18.21	34.98	40.45	46.82

表 3 钢纤维混凝土孔径分布

编号	$d < 20 \text{ nm}$	$20 \text{ nm} \leq d < 50 \text{ nm}$	$50 \text{ nm} \leq d < 200 \text{ nm}$	$d \geq 200 \text{ nm}$	%
PC	13.14	43.70	38.45	4.30	
SFC-0.5	43.24	40.35	14.02	2.15	
SFC-1.0	52.39	30.29	10.32	4.51	
SFC-1.5	80.01	12.41	3.09	2.62	
SFC-2.0	21.39	44.40	29.35	3.74	

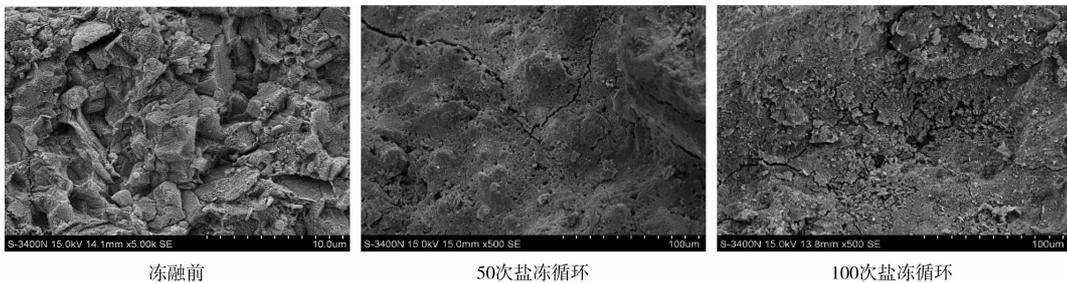


图 4 PC 冻融前后 SEM 图片

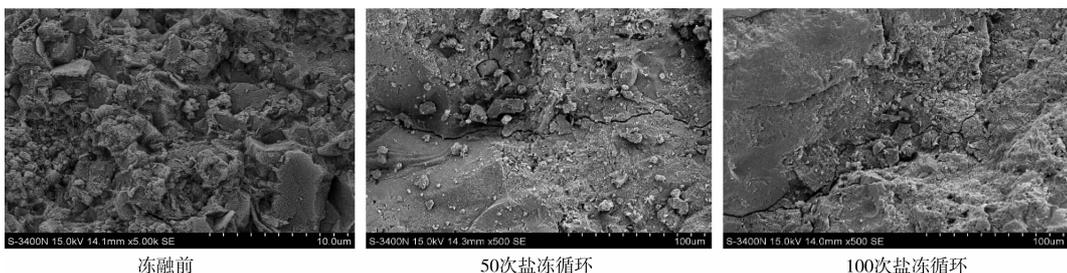


图 5 SFC-1.5 冻融前后 SEM 图片

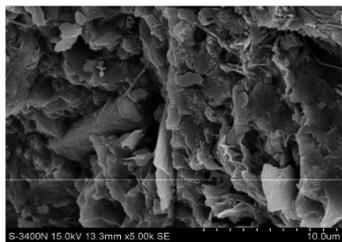
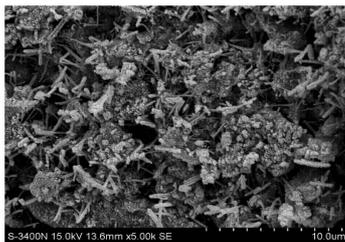
图 6 界面处 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体

图 7 界面处钙矾石晶体

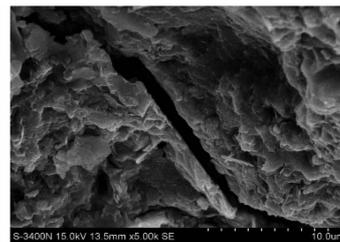


图 8 SFC-2.0 界面(盐冻 100 次)

4 结论

1) 在冻融环境中, 钢纤维混凝土的质量损失率和相对动弹模量损失率明显降低, 抗冻性能得到提高。而且, 钢纤维的掺入不仅提高了混凝土的劈裂强度, 同时还延缓了冻融损伤后混凝土劈裂强度的降低速率。

2) 钢纤维对遭受盐冻破坏的混凝土表面剥蚀改善作用有限, 并且盐冻破坏加快了钢纤维混凝土内部损伤, 盐冻循环次数明显低于水冻循环次数。

3) 钢纤维掺量对混凝土抗冻性能影响显著, 随着掺量的增加, 混凝土抗冻性能增强。当掺量为 1.5% 时, 钢纤维的增强效果最好; 但是当掺量增大到 2.0% 时, 混凝土抗冻性能降低。

4) 孔结构和扫描电镜分析表明, 适量钢纤维掺入后, 混凝土内部孔结构改性良好, 微裂缝发展速度缓慢, 钢纤维阻裂、增强作用明显。

参考文献:

- [1] Shafiqh P, Mahmud H, Jumaat M Z. Effect of steel fiber on the mechanical properties of oil palm shell lightweight concrete [J]. *Materials and Design*, 2011 (32): 3926-3932.
- [2] 杨松霖, 刁波. 超高性能钢纤维混凝土力学性能[J]. *交通运输工程学报*, 2011, 11(2): 8-13.
YANG Songlin, DIAO Bo. Mechanical properties of ultra-high performance steel fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2011, 11(2): 8-13.
- [3] Holschemacher K, Mueller T, Ribakov Y. Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete [J]. *Materials and Design*, 2010 (3): 2604-2615.
- [4] Olivito R S, Zuccarello F A. An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete [J]. *Composites*, 2010, 41: 246-255.
- [5] 陈好, 刘荣桂, 付凯. 冻融循环下海工预应力混凝土结构的耐久性[J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(1): 17-21.

CHEN Yu, LIU Ronggui, FU Kai. Durability for marine pre-stressed structures with freezing-thawing cycles [J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(1): 17-21.

- [6] 张士萍, 邓敏, 唐明述. 混凝土冻融循环破坏研究进展 [J]. *材料科学与工程学报*, 2008, 26(6): 990-994.
ZHANG Shiping, DENG Min, TANG Mingshu. Advance in research on damagement of concrete due to freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2008, 26(6): 990-994.
- [7] 叶建雄, 陈越, 张靖, 等. 水泥基材料超低温冻融循环试验研究 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(5): 125-129.
YE Jianxiong, CHEN Yue, ZHANG Jin, et al. Experimental analysis of freeze-thaw recycle with ultra-low temperature for cementitious material [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2010, 32(5): 125-129.
- [8] 谢晓鹏, 高丹盈, 赵军. 钢纤维混凝土冻融和碳化后力学性能试验研究 [J]. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 38(4): 514-517.
XIE Xiaopeng, GAO Danying, ZHAO Jun. Tentative study on the mechanical property under the action of freeze-thaw and carbonation of steel fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition*, 2006, 38(4): 514-517.
- [9] 康晶. 玻纤-钢纤维对混凝土抗裂和冻融性能的影响 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
KANG Jing. Influence of glass fiber-steel fiber on the shrinkage resistance and freeze-thaw behaviour of concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [10] Yang Q B, Zhu B R. Effect of steel fiber on the deicing-scaling resistance of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35: 2360-2363.
- [11] Pigeon M, Marchand J, Pleau R. Frost resistant concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 1996, 10(5): 339-348.

- 197-223.
- [10] Wardeneir J. Hollow section joints [M]. Delft: Delft University Press, 1982; 33-46.
- [11] Martinez-Saucedo G, Packer J A, Christopoulos C. Gusset plate connections to circular hollow section braces under inelastic cyclic loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 135(7): 1252-1258.
- [12] Willibad S, Packer J A, Voth A P, et al. Through-plate joints to elliptical and circular hollow sections [C]//11th. International Symposium on Tubular Structures, Quebec, 2006.
- [13] Ariyoshi M, Makino Y, Choo Y S. Introduction to the database of gusset-plate to CHS tube joints [C]// Proceedings of 8th International Symposium on Tubular Structures, Singapore: Singapore Steel Construct, 1998; 22-28.
- [14] Kim W B. A study on connections of circular hollow section with gusset plate [J]. J Architectural Inst Korea 1997, 13(3): 263-271.
- [15] Kim W B. A Study on the local deformation of tubular connection in truss [J]. Conference Korean Society of Steel Construct, 1995, 7(2): 135-140.
- [16] Kim W B. Ultimate strength of tube-gusset plate connections considering eccentricity [J]. Engineering Structures, 2001, 23 (7) : 1418-1426.

(编辑 胡英奎)

(上接第 84 页)

- [12] 杨全兵. 冻融循环条件下氯化钠浓度对混凝土内部饱水度的影响[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(1): 96-100.
YANG Quanbing. Effect of sodium chloride concentration on saturation degree in concrete under freeze-thaw cycles [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(1): 96-100.
- [13] Valenza II J J, Scherer G W. A review of salt scaling: I. phenomenology [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(7): 1007-1021.
- [14] Valenza II J J, Schere G W. A review of salt scaling: II. mechanisms [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(7): 1022-1034.
- [15] Powers T C, Helmuth R A. Theory of volume change in hardened portland cement paste during freezing [J]. Highway Research Board, 1953, 32: 85-21.
- [16] Powers T C. The air requirement of frost-resistant concrete [J]. Proceeding of the Highway Research Board, 1949, 29: 184-202.
- [17] Yazici S, Inan G, Tabak V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21: 1250-1253.

(编辑 罗 敏)