

# 荷载对混凝土在腐蚀 - 冻融作用下强度的影响

余红发<sup>1</sup>, 孙伟<sup>2</sup>, 李美丹<sup>3,4</sup>

(1. 南京航空航天大学 土木工程系, 南京 210016, yuhongfa@nuaa.edu.cn; 2. 东南大学 材料科学与工程系, 南京 210096;  
3. 沈阳建筑大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110168; 4. 天津市市政(公路)工程研究院, 天津 300074)

**摘要:** 为研究混凝土的多因素耐久性, 采用高浓度腐蚀介质, 测定普通混凝土(OPC)、高强混凝土(HSC)、高性能混凝土(HPC)、钢纤维增强高强高性能混凝土(SFRHPC)和高强高模聚乙烯纤维增强高强高性能混凝土(HEMPFRHPC)在(化学腐蚀+冻融循环)双重破坏因素(DDF)和(弯曲荷载+化学腐蚀+冻融循环)多重破坏因素(MDF)作用下的强度变化. 结果表明: 在1 500次DDF和1 600次MDF作用下, 混凝土的抗压强度均存在不同程度的下降, 弯曲荷载比对混凝土在MDF作用下抗压强度的降低作用存在一个阈值: HSC和HPC为40%, PFRHPC为20%, SFRHPC > 65%. 掺加矿物掺合料有利于稳定高强度等级混凝土在MDF作用下的抗压强度, 进一步掺加钢纤维还能够确保混凝土抗折强度的持续增长.

**关键词:** 混凝土; 耐久性; 冻融循环; 化学腐蚀; 双重破坏因素; 多重破坏因素

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)02-0297-05

## Effect of flexural stress on strength development of concrete subjected to combined actions of freezing - thawing cycles and chemical attack

YU Hong-fa<sup>1</sup>, SUN Wei<sup>2</sup>, LI Mei-dan<sup>3,4</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China, yuhongfa@nuaa.edu.cn; 2. Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
3. College of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;  
4. Tianjin Municipal Engineering Research Institute, Tianjin 300074, China)

**Abstract:** To study the durability of concrete subjected to multiple damage factors, by adopting high concentration chemical attack solutions, we investigated the strength development of ordinary Portland cement concrete (OPC), high-strength concrete (HSC), high-performance concrete (HPC), steel fiber reinforced high-performance concrete (SFRHPC) and high elasticity module polyethylene fiber reinforced high-performance concrete (HEMPFRHPC) subjected to double damage factors (DDF), which are the combined actions of freezing-thawing cycles and chemical attack, and multiple damage factors (MDF), which are the combined actions of flexural load, freezing-thawing cycles and chemical attack. Results show that when subjected to 1 500 cycles of DDF or 1 600 cycles of MDF, the compressive strengths of all tested concretes are decreased. Further research indicates that there exists a critical stress ratio for flexural load to impair compressive strength of high grade concrete subjected to MDF, which is 40%, 40%, 20%, and more than 65% for HSC, HPC, PFRHPC and SFRHPC, respectively. It can be concluded that mineral admixture benefits the compressive strength of high grade concrete subjected to bitter MDF, additional steel fiber can even guarantee the continuous increase of flexural strength.

**Key words:** concrete; durability; freezing-thawing cycles; chemical attack; double damage factors (DDF); multiple damage factors (MDF)

收稿日期: 2006-09-15.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB623203); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2005216).

作者简介: 余红发(1964—), 男, 教授, 博士生导师;

孙伟(1935—), 女, 博士生导师, 中国工程院院士.

化学腐蚀和冻融破坏是实际混凝土结构常见的破坏方式, 而且在我国东部沿海滩涂或北方盐渍土地区, 化学腐蚀和冻融破坏往往同时存在, 对

于混凝土结构的关键受力部位,上述物理化学作用还受外部荷载的影响.有关混凝土在化学腐蚀或冻融循环等单一破坏因素(single damage factor, SDF)作用下的耐久性问题,国内外已经进行了大量研究.近 10 年来, Janssen 等<sup>[1]</sup>、慕儒等<sup>[2-4]</sup>和余红发等<sup>[5-7]</sup>考虑了双重破坏因素(double damage factors, DDF)作用下混凝土的耐久性问题,测定了混凝土在(化学腐蚀+冻融循环)、(弯曲荷载+化学腐蚀)等 DDF 作用下相对动弹性模量的变化规律,为了将考虑的影响因素增加到 3 个以上,即研究多重破坏因素(multiple damage factors, MDF)作用下混凝土的耐久性问题,孙伟等<sup>[8-9]</sup>和余红发等<sup>[10-11]</sup>进一步分析了弯曲荷载对混凝土在(化学腐蚀+冻融循环) DDF 作用下相对动弹性模量的影响,但是,弯曲荷载对混凝土在(化学腐蚀+冻融循环) DDF 作用下的强度有何影响,尚未见报道.本文针对我国严酷腐蚀环境,分别测定了多种混凝土在(化学腐蚀+冻融循环) DDF 和(弯曲荷载+化学腐蚀+冻融循环) MDF 作用下的抗压与抗折强度,系统地探讨了混凝土的 MDF 强度规律.

表 1 混凝土的配合比与性能

混凝土	材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )											坍落度 mm	含气量 %	28 d 抗压强度 MPa
	水泥	SF	FA	SG	AEA	砂	石	水	JM-B	钢纤维	HEMPF			
OPC	325	0	0	0	0	647	1150	195	0	0	0	45	1.4	35.2
HSC	540	0	0	0	60	610	1134	150	3.9	0	0	45	1.8	85.3
HPC	270	54	108	108	60	610	1134	172	3.9	0	0	45	2.0	83.1
SFRHPC	270	54	108	108	60	785	957	180	3.9	156	0	35	2.1	81.2
HEMPFRHPC	270	54	108	108	60	785	957	180	3.9	0	1	45	3.0	70.4

## 1.2 实验与测试方法

混凝土的成型与养护执行 GBJ81-85. 采用 40 mm × 40 mm × 160 mm 的棱柱体试件. 强度采用标准方法测定, 40 mm × 40 mm × 160 mm 试件标准养护 90 d 的强度见表 2. 冻融实验执行 GBJ82-85《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》, 设备为 DTR-1 型混凝土快速冻融实验机, 冻融试件的标准养护龄期为 90 d. 小型双弹簧加载装置由慕儒等<sup>[12]</sup>设计, 施加的弯曲荷载以与

表 2 不同混凝土的标准养护 90 d 强度 MPa

混凝土	抗压强度	抗折强度
OPC	49.9	6.41
HSC	118.1	12.19
HPC	111.6	13.1
SFRHPC	116.5	11.66
HEMPFRHPC	106.0	10.16

## 1 实验

### 1.1 原材料与配合比

水泥、砂、石、水同文献[5]. 硅灰(Silica fume, SF)、粉煤灰(Fly ash, FA)和矿渣(Slag, SG)等矿物掺合料、铝酸盐混凝土膨胀剂(Aluminate expansion agent, AEA)和 JM-B 型高效减水剂同文献[6]. 钢纤维和高强高模聚乙烯纤维(High elasticity module polyethylene fiber, HEMPF)见文献[10]. 表 1 是混凝土配合比及其标准养护 28 d 的立方体抗压强度: C30 普通混凝土(Ordinary Portland cement concrete, OPC)、不含掺合料的 C80 高强混凝土(high strength concrete, HSC)、复合掺加(10% SF + 20% FA + 20% SG)的 C80 高强高性能混凝土(high performance concrete, HPC)和 C80 钢纤维增强高强 HPC(steel fiber reinforced HPC, SFRHPC)以及 C70 HEMPF 增强 HPC(HEMPF reinforced HPC, HEMPFHPC). 其中, HPC、SFRHPC 和 HEMPFHPC 的 AEA 掺量占总胶凝材料质量的 10%, 后两者的纤维掺量分别占混凝土总体积的 2% 和 0.1%.

弯曲破坏荷载的百分比表示, 简称弯曲荷载比. 腐蚀介质为模拟新疆、青海、内蒙古和西藏盐湖的高浓度复合溶液, 化学成分见文献[5].

## 2 结果与讨论

### 2.1 混凝土在(化学腐蚀+冻融循环) DDF 作用下的强度特征

图 1 是混凝土在(化学腐蚀+冻融循环) DDF 作用下经过 1 500 次循环后的强度. 结果表明, 在 1 500 次 DDF 作用下, 不同混凝土的强度有很大的差异, 盐湖卤水种类的影响也十分明显. OPC 试件在新疆、内蒙古和西藏盐湖卤水的 DDF 作用下形成了以膨胀性的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O 为主的低温结晶相, 其结晶压作用导致混凝土很快破坏, 在 50 次冻融循环时就已经不具备强度, 但 OPC 在青海盐湖卤水 DDF 作用下形成的低温结晶相是以非膨胀性的 NaCl 为主, 而且卤水在 -17 °C 不结

冰,因而不存在冻融破坏作用<sup>[5]</sup>,即使冻融循环达到1500次,仍然保留一定的强度,抗压和抗折强度分别为35.5 MPa和4.4 MPa,比冻前强度分别降低了28.8%和31.4%。

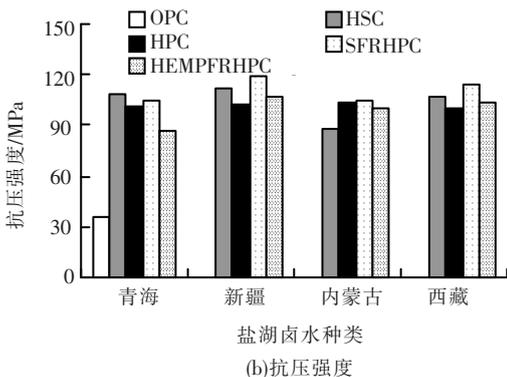
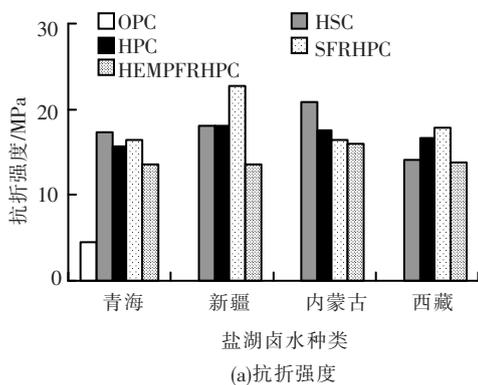


图1 混凝土在(化学腐蚀+冻融循环)DDF作用下经过1500次循环后的强度

HSC的冻前抗压与抗折强度分别为118.1 MPa和12.19 MPa,在青海、新疆、内蒙古和西藏盐湖卤水中冻融1500次循环以后,抗压强度分别降低了8.2%,5.3%,25.1%和9.7%,抗折强度不但不降低,反而分别提高了42.7%,47.7%,70.6%和14.8%。这表明,在DDF作用下,为了反映高强度等级混凝土的损伤劣化,采用抗压强度描述强度变化比采用抗折强度更加合适。从DDF强度数据上看,HSC不适合于内蒙古盐湖环境。

HPC的冻前抗压强度为111.6 MPa,抗折强度为13.1 MPa,在4种盐湖卤水中冻融1500次循环后的抗压强度降低幅度分别为:青海9.3%,新疆7.8%,内蒙古7.6%和西藏9.9%;抗折强度提高幅度依次是:19.1%,38.2%,34.4%和26.7%。与不掺矿物掺合料的HSC相比,掺矿物掺合料的HPC更适合于内蒙古盐湖环境。

在冻融前,SFRHPC的抗压与抗折强度分别为116.5 MPa和11.66 MPa,在4种盐湖卤水中冻融1500次循环后的抗压强度降低幅度分别为:青海9.9%,新疆-2%(实际上是增加),内蒙

古5.3%和西藏2.1%;抗折强度提高幅度依次是:39.8%,95.5%,40.7%和51.8%。与单掺矿物掺合料的HPC相比,同时掺矿物掺合料和钢纤维的SFRHPC明显改善了HPC在新疆、内蒙古和西藏盐湖卤水DDF作用下的强度,但在青海盐湖卤水中稍差。

HEMPFRHPC的冻前抗压与抗折强度分别为106 MPa和10.16 MPa,在4种盐湖卤水中冻融后的抗压强度降低幅度分别为:青海18.1%,新疆-0.7%,内蒙古10.1%和西藏2.7%;抗折强度提高幅度依次是:33.9%,34.8%,57.5%和36.8%。与SFRHPC相比,HEMPFRHPC在青海和内蒙古盐湖卤水DDF作用下的强度降低幅度要大许多,在新疆和西藏盐湖卤水中则旗鼓相当。

上述分析表明,高强度等级混凝土在DDF和MDF作用下,抗压与抗折强度的变化规律有很大的区别,通常情况是前者提高时,后者提高幅度就更大,甚至出现抗压强度降低而抗折强度却大幅度提高的现象。这并不矛盾,当 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 等物理结晶性腐蚀产物在小孔内形成时,对混凝土孔尺寸减小的影响比对孔隙率降低的影响要大得多<sup>[13]</sup>。根据材料的断裂力学理论和孔隙率强度理论,前者决定了抗折强度,后者则影响抗压强度。

## 2.2 混凝土在(弯曲荷载+化学腐蚀+冻融循环)MDF作用下的强度规律

图2是混凝土在(弯曲荷载+化学腐蚀+冻融循环)MDF作用下经过1600次循环后的强度实验结果。施加的弯曲荷载比分别是:OPC为30%,其余为40%。结果表明,OPC在新疆、内蒙古和西藏盐湖卤水的MDF作用下,很快发生破坏,但是在青海盐湖卤水中经历1600次MDF循环作用以后,其抗压强度比冻前降低了7.6%,而抗折强度却提高了27.9%。与不加载的1500次DDF作用相比,OPC抗压强度的降低幅度变小了,抗折强度反而提高了,其原因是非膨胀性NaCl等盐类渗入在孔隙内结晶<sup>[5]</sup>,在施加荷载的约束条件下这些晶体填充孔隙,使孔隙率降低、孔径减小。这同混凝土的硫酸盐腐蚀规律<sup>[14]</sup>是相似的,即开始有一个强度提高阶段,当达到一定的时间以后,就会出现一个后续强度降低阶段,如果继续冻融,OPC必然发生破坏。

HSC在青海、新疆、内蒙古和西藏盐湖卤水的1600次MDF作用下,抗压强度比冻前分别降低了16.7%,4.7%,33.9%和11.3%,抗折强度比冻前分别提高了47.7%,91.1%,11.6%和

54.2%。抗压与抗折强度变化幅度的不一致现象与 DDF 作用相同。与不加载的 1 500 次 DDF 作用相比, HSC 在 1 600 次加载 MDF 作用下强度的降低幅度在新疆盐湖卤水中差别不大, 在其他盐湖卤水中均有明显的变大, 尤其是在青海和内蒙古盐湖卤水中其强度降低幅度增大了 8.5 和 8.8 个百分点。相比较而言, HSC 在新疆盐湖卤水 MDF 作用下的强度最高。

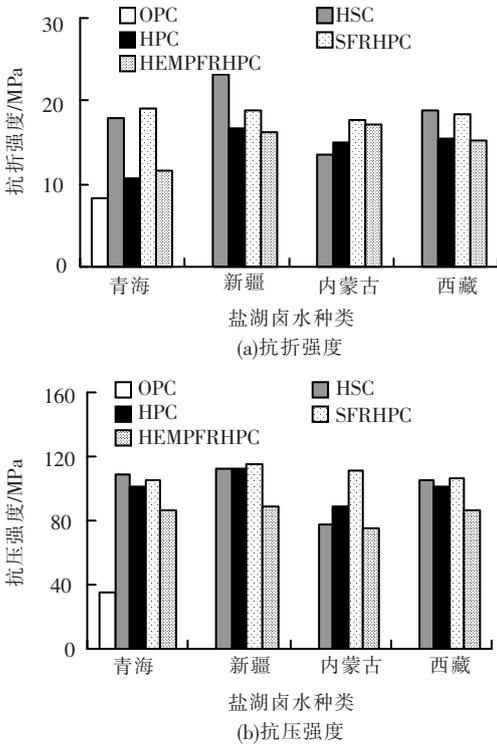


图 2 混凝土在(弯曲荷载+化学腐蚀+冻融循环)MDF 作用下经过 1 600 次循环后的强度

对于掺矿物掺合料的 HPC, 在青海、新疆、内蒙古和西藏盐湖卤水的 1 600 次 MDF 作用下, 抗压强度分别比冻前降低了 16.7%, -0.6% (实际是提高), 20.9% 和 9%, 抗折强度分别比冻前提高了 -18.3% (实际是降低), 26.7%, 14.5% 和 17.6%。根据 MDF 强度的变化幅度大小, HPC 在新疆、内蒙古和西藏盐湖卤水中抗压强度的降低幅度小于 HSC, 在青海盐湖卤水中两者相同。这说明掺加矿物掺合料以后, 有利于稳定高强度等级混凝土在盐湖卤水 MDF 作用下的抗压强度。与不加载的 1 500 次 DDF 作用相比, HPC 在青海和内蒙古盐湖卤水的 1 600 次加载 MDF 作用下, 抗压强度的降低幅度增加了 7.4 和 13.3 个百分点, 在西藏盐湖卤水中的差异不明显, 但是在新疆盐湖卤水 MDF 作用下抗压强度没有降低, 反而略有增长。

SFRHPC 在青海、新疆、内蒙古和西藏盐湖卤水的 1 600 次 MDF 作用下, 抗压强度分别比冻前降低了 -0.6% (实际是提高), 0.8%, 4.8% 和 8.8%, 抗折强度分别比冻前提高了 63.8%,

61.2%, 51.8% 和 56.9%。与 HSC 和 HPC 相比, 在 MDF 作用下, SFRHPC 具有 3 个显著的特征: 抗压强度最高; 抗压强度降低幅度最小; 抗折强度的增长幅度比较大。可见, 掺加钢纤维不仅能够维持高强度等级混凝土在盐湖卤水 MDF 作用下的高抗压强度, 而且能够确保其抗折强度的持续增长, 显示出 SFRHPC 在严酷条件下具有非常显著的技术优势。与不加载的 1 500 次 DDF 作用相比, SFRHPC 在 1 600 次加载 MDF 作用下的抗压强度, 在新疆和西藏盐湖卤水中降低得更多, 但在青海和内蒙古盐湖卤水中则降低得少一些, 甚至会有所提高。

对于同时掺加矿物掺合料和 HEMPF 纤维的 HEMPFRHPC, 在青海、新疆、内蒙古和西藏盐湖卤水的 1 600 次 MDF 作用下, 抗压强度分别比冻前降低了 41.8%, 15.9%, 29.2% 和 19%, 抗折强度分别比冻前提高了 15.2%, 59.4%, 69.3% 和 49.6%。与 HPC 相比, HEMPFRHPC 在 MDF 作用下抗压强度的降低幅度要大得多, 可见, HPC 掺加 HEMPF 纤维的效果明显不如掺加钢纤维。与不加载 DDF 作用相比, HEMPFRHPC 在加载 MDF 作用下抗压强度降低得更多。

### 2.3 混凝土在 MDF 作用下的强度与弯曲荷载比之间的关系

图 3 是弯曲荷载比对高强度等级混凝土在(弯曲荷载+化学腐蚀+冻融循环)MDF 作用下抗压强度的影响规律。冻融介质为新疆盐湖卤水, 冻融循环次数为 1 600 次。由图 3 可见, 弯曲荷载大小对高强度等级混凝土在 1 600 次 MDF 作用下抗压强度的影响存在一个比例阈值。当荷载比小于该阈值时, 混凝土在 MDF 作用下的抗压强度并不随着荷载比的增大而降低, 对于 HPC 和 HEMPFRHPC 甚至还会提高 (HPC 最多可提高 9%, HEMPFRHPC 最多能提高 5.2%), 当荷载比大于该阈值时, 混凝土在 MDF 作用下的抗压强度显著降低。4 种高强度等级混凝土的

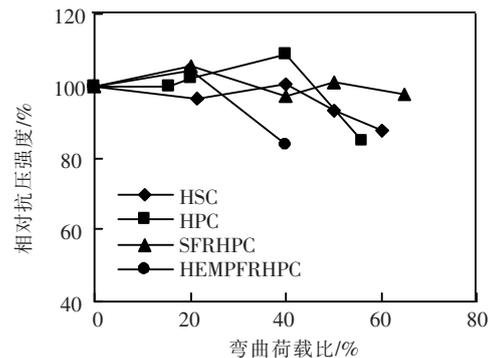


图 3 弯曲荷载比对高强度等级混凝土在新疆盐湖卤水的 1 600 次 MDF 作用下抗压强度的影响

弯曲荷载比阈值分别是:HSC和HPC为40%,HEMPFRHPC为20%,SFRHPC应该大于65%。这充分说明,钢纤维增强HPC最适应于在盐湖环境条件承受(弯曲荷载+化学腐蚀+冻融循环)MDF作用下工作,比不掺纤维的HSC和HPC具有更好的耐久性。

### 3 结 论

1)在(化学腐蚀+冻融循环)DDF和(弯曲荷载+化学腐蚀+冻融循环)MDF作用下,OPC经过50次冻融循环就已经发生破坏。对于青海盐湖卤水条件,OPC在1500次DDF作用下的抗压和抗折强度大幅度下降,当OPC施加30%弯曲荷载时,经过1600次加载MDF作用后,由于外界约束条件下NaCl等盐类晶体在混凝土孔隙内部的填充作用,降低了孔隙率,减小了孔径,其抗压强度降低幅度变小了,抗折强度反而有所提高。

2)HSC、HPC、SFRHPC和HEMPFRHPC在DDF和MDF作用下,普遍存在抗压强度降低、抗折强度提高的基本规律。因此,采用抗压强度的变化比采用抗折强度更能反映高强度等级混凝土的DDF或MDF损伤劣化。

3)在1500次DDF作用下,HSC在内蒙古盐湖卤水中的抗压强度损失明显大于HPC,因此,HPC在内蒙古盐湖环境中的适应性优于HSC。此外,SFRHPC显著改善了HPC在新疆、内蒙古和西藏盐湖卤水DDF作用下的强度,HEMPFRHPC在青海和内蒙古盐湖卤水DDF作用下的抗压强度降低幅度比SFRHPC要大得多。

4)当施加40%弯曲荷载时,在1600次加载MDF作用下,HSC或HPC在青海与内蒙古盐湖卤水中、SFRHPC在新疆和西藏盐湖卤水中以及HEMPFRHPC在4种盐湖卤水中抗压强度的降低幅度,与非加载DDF作用相比都显著增大。掺加矿物掺合料有利于稳定高强度等级混凝土在MDF作用下的抗压强度,进一步掺加钢纤维还能够确保混凝土抗折强度的持续增长。

5)弯曲荷载对高强度等级混凝土在盐湖卤水的MDF作用下抗压强度的影响存在一个比例阈值,当弯曲荷载比大于该阈值时,混凝土在MDF作用下的抗压强度显著降低。不同混凝土的弯曲荷载比例阈值分别是:HSC和HPC为40%,PFRHPC为20%,SFRHPC大于65%。

6)SFRHPC适于承受(化学腐蚀+冻融循环)DDF和(弯曲荷载+化学腐蚀+冻融循环)MDF的共同作用,因而在严酷的腐蚀环境有较好

的应用前景。

### 参 考 文 献:

- [1] JANSSEN D J, SNYDER M B. Mass loss experience with ASTM C666: With and without deicing salt [C]// Proc the Inter Workshop in the Resistance of Con to Scaling Due to Freezing in the Presence of Deicing Salt. Quebec, Canada, 1997:247-258.
- [2] MU R, MIAO C W, LIU J P. Properties of concrete subjected to freezing and thawing under sulphate attack [J]. Indian Concrete Journal, 2001, 75(7): 451-454.
- [3] MU R, MIAO C W, BREUGEL K V, *et al.* Properties of air-entrained concrete subjected to freeze-thaw cycles and salt attack simultaneously [C]//Advanced in Concrete and Structures, Proceedings of the International Conference ICACS. Xuzhou, 2003:982-988.
- [4] 慕儒, 缪昌文, 刘加平, 等. 氯化钠硫酸钠溶液对混凝土抗冻性的影响及其机理 [J]. 硅酸盐学报, 2001, 29(6): 523-529.
- [5] 余红发, 孙伟, 武卫锋, 等. 普通混凝土在盐湖环境中的抗卤水冻蚀性与破坏机理研究 [J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(8): 763-769.
- [6] 余红发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 在盐湖环境中高强与高性能混凝土的抗冻性 [J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(7): 842-848.
- [7] 余红发, 孙伟, 刘连新, 等. 在盐湖卤水环境中混凝土应力腐蚀行为 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(12): 1965-1968.
- [8] SUN Wei, MU R, LUO X, *et al.* Effect of chloride salt, freeze-thaw cycling and externally applied load on the performance of the concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(12): 1859-1864.
- [9] 孙伟, 余红发, 王晴, 等. 弯曲荷载对混凝土在盐湖环境中抗卤水冻蚀性的影响 [J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(7): 46-49.
- [10] 余红发, 慕儒, 孙伟, 等. 弯曲荷载、化学腐蚀和碳化作用及复合对混凝土抗冻性的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(4): 492-499.
- [11] YU Hongfa, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, *et al.* Durability of concrete subjected to the combined actions of flexural stress, freeze-thaw cycles and bitter solutions [J]. J Wuhan Un Tech, 2008, 23(6): 893-900.
- [12] 慕儒, 严安, 孙伟. 荷载与冻融同时作用下HSC和SFRHSC的耐久性 [J]. 工业建筑, 1998, 28(8): 11-14.
- [13] 余红发. 盐湖地区高性能混凝土的耐久性、机理与使用寿命预测方法 [D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [14] CLIFTON J R, NAUS D J, AMEY S L, *et al.* Service-life Prediction—State-of-the-Art Report [R]. ACI 365.1R-00, Michigan: ACI Committee 365, 2000: 1-20. (编辑 刘 彤)