

# 极端温度冻融循环对混凝土耐久性的影响

任战鹏<sup>1</sup>, 牛荻涛<sup>2</sup>, 吴敬涛<sup>1</sup>, 张 剑<sup>2</sup>, 孟 宁<sup>1</sup>

(1. 中国飞机强度研究所, 陕西 西安 710065; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 采用飞机结构及机构环境试验系统模拟实验室内极端温度环境, 对不同型号混凝土试块进行环境耐久性试验, 得出了极端环境温度条件下冻融循环次数与混凝土试块的相对动弹性模量、质量损失率、抗折强度损失率和抗压强度损失率之间的变化规律, 自然养护和未添加钢纤维混凝土试块在经历 60 次冻融循环后, 其冻融特性出现明显下降. 标准养护和添加钢纤维组混凝土试块的冻融特性明显优于自然养护和未添加钢纤维组的混凝土试块.

**关键词:** 混凝土地坪; 极端温度; 冻融循环; 耐久性

**中图分类号:** TB302.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2018)02-0220-05

## Effect of freezing-thawing cycle on the durability of concrete under extreme environment conditions

REN Zhanpeng<sup>1</sup>, NIU Ditao<sup>2</sup>, WU Jingtao<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>, MENG Ning<sup>1</sup>

(1. AVIC Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China;

2. College of Civil Engineering, Xi'an Univ of Arch & Tech, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Using the environment test system of airplane structure the extreme temperature was simulated to examine the durability of different groups of concrete. The study found the relationships between relative dynamic elastic modulus, mass loss ratio, compressive strength loss ratio, flexural strength loss ratio and the freezing-thawing cycle number. After 60 times freezing-thawing cycle, the freezing-thawing characteristics of concretes with natural curing condition and concretes with steel-free fiber evidently declined. Concretes with standard curing condition and Concretes with steel fiber have batter freezing-thawing characteristics than the concretes with natural curing condition and the concretes with steel-free fiber.

**Key words:** concrete floor; extreme temperature; freezing-thawing cycle ;durability

混凝土的耐久性是指在其使用过程中抵抗环境介质作用并长期保持良好使用性能和外观完整性, 从而维持混凝土结构的安全及正常使用的能力<sup>[1]</sup>. 目前针对混凝土冻融特性的研究很多, 但是冻融环境温度都是在 $-20\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, GJB 82—85 中冻融试验要求在冻结和融化终了时, 试验件中心温度也在 $-17\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $8\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 对更严酷条件下混凝土冻融特性的研究很少. 文献[2-3]从理论上对混凝土在冻融冻融循环条件下的损伤特性及寿命预测进行了详细的分析. 文献[4-6]研究了一般温度( $-0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上)冻融循环条件下, 海水中的混凝土、加钢纤维混凝土冻融以及碳化后混凝土力学特性进行了试验分析, 但没有对更严酷温度条件下的混凝土力学特性以及耐久性进行试验分析. 混凝土在使用过程中, 随着使用时间的推移会出现各种各样的耐久性问题, 这些有可

能会导致混凝土结构尚未达到设计使用年限, 就已经提前失效, 或者说虽未达到失效标准, 却存在着严重的安全隐患. 对于用于极端温度环境下的混凝土建筑, 比如桥墩、水坝、码头等工程, 受干湿和高低温交替环境的影响, 使得混凝土结构出现冻融损伤, 抗压强度和抗折强度等性能参数均出现衰退, 甚至出现冻融破坏, 使建筑结构不能达到设计使用寿命<sup>[7-9]</sup>. 混凝土冻融特性作为混凝土耐久性最具代表性的指标<sup>[10-13]</sup>, 在极端环境使用前, 必须对混凝土的耐久性进行试验研究, 得出极端环境影响下混凝土结构耐久性的变化规律, 为建筑的材料选型和结构设计提供设计依据.

根据实验室地坪所遇到的极端环境, 开展了极端温度环境下环境室混凝土地坪的冻融试验研究, 对极端高低温冻融环境下混凝土质量、动弹

模量、抗压强度和抗折强度的变化规律进行了研究，得出极端环境冻融循环对不同类型混凝土冻融特性的影响，为混凝土地坪的材料选型及设计提供参考和依据。

1 试件、试验设备及试验方案

1.1 试件

验共包括 G1—G4 四组试验件，每组试验件强度等级及养护条件见表 1。每组包括两种形状的试验件，一种是用于测试质量损失、动弹性模量和抗折强度的 150 mm×150 mm×550 mm 的棱柱体试块，另一种是用于测试抗压强度的 150 mm×

150 mm×150 mm 正方体试块。

试件制作完成后根据 GB/T 50082-2009 标准要求对各组试验件进行养护<sup>[14]</sup>。养护结束后，每组试件抽取三个试件进行初始抗压强度检测，各组取其平均值得出试件的初始抗压强度，见表 2。从试件初始抗压强度测试来看，强度等级 C50 的 G1 组试件最高，强度等级 C40 的三组试件，标准养护并掺加钢纤维的 G2 组试件抗压强度最高，次之的为自然养护并掺加钢纤维的 G3 组试件，而标准养护但未掺加钢纤维的 G4 组试件抗压强度最低，这说明掺加钢纤维对提高混凝土的抗压强度有着比较大的影响。

表 1 试件信息

Tab. 1 The information of test pieces

组别	混凝土 强度等级	养护条件	棱柱体 试件数量	立方体 试件数量	是否添加钢 纤维/kg·m <sup>-3</sup>	是否添加引 气剂/kg·m <sup>-3</sup>
G1	C50	标准养护	40(3)	40	78	0.099
G2	C40	标准养护	40(2)	40	78	0.075
G3	C40	自然养护	40(3)	40	78	0.075
G4	C40	标准养护	40(1)	40	0	0.075

注：棱柱体试块数量后括号内数字为预埋测温传感器试块的个数。

表 2 试验件初始抗压强度

Tab. 2 The initial compressive strength of test pieces

试件组	G1	G2	G3	G4
初始抗压强度 MPa	75.7	59.6	54.8	52.6

1.2 试验设备

采用 UC240 环境箱对 G1—G4 组试验件进行冻融试验，该环境箱容积为 280 m<sup>3</sup>，温度控制范围为-70~150℃，温度均匀度≤2.0℃，温度波动度≤±0.5℃。试验通过在温度监测试块中心预埋热电偶来检测试验温度，并作为试验温度控制的输入值，温度监测试块布置在环境箱内不同区域。试验采用的热电偶温度测量范围为-80~120℃，测量精度为±0.5℃，每个小循环冻融试验结束后，分别使用电子天平秤、NM-4B 型非金属超声检测分析仪、DLY-30T 型万能材料试验机、TYA-2000 型压力试验机对各组试验件的质量、动弹模量、抗折强度和抗压强度进行测量。

1.3 试验方法

试件制作完成后，根据养护标准要求分别对试件养护，养护结束后将所有试验件按组放入水池进行浸水 4 d，使得试验件充分吸水，之后将试

件表面水擦拭干净按组放入环境箱进行冻融试验，试验平均升降温速率约为 10.7℃/h。

整个试验共进行 120 次冻融循环，每 10 次冻融循环为一个小循环，图 1 给出了每个小循环升降温过程。由于试件中心温度相对试验环境箱温度具有滞后性，因此，试验温度控制以试件中心温度为准，试件中心温度采用预埋在试件中心位置的热电偶来采集。每个小循环的低温阶段试件中心温度降至-55℃，高温阶段前 9 次试件中心温度升至 20℃，每次试件中心温度到达 20℃后对所有的试

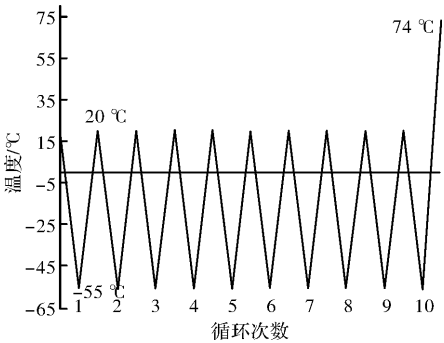


图 1 冻融小循环升降温过程

Fig. 1 Heating and cooling process of each small freezing-thawing cycle

验件进行一次洒水, 保证试验件的含水量, 第10次高温循环试件中心温度升至+74℃。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 冻融作用对混凝土试件相对动弹性模量的影响

混凝土相对动弹性模量反映了混凝土内部结构的劣化过程, 是混凝土内部损伤程度的评价指标<sup>[15]</sup>。固体材料的动弹性模量  $E_d$  与其表面波速之间的关系为

$$E_d = \frac{2(1+\mu)^3 \rho V^2}{(0.87+1.12\mu)^2} = \frac{2(1+\mu)^3 \rho L^2}{(0.87+1.12\mu)^2 T^2} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为固体材料密度;  $V$  为表面波速度;  $\mu$  为泊松比;  $L$  为试件长度;  $T$  为声波声时。

根据该式可得出混凝土试块的相对动弹性模量与声波声时值之间的关系:

$$E_{rd} = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} = \frac{V_n^2}{V_0^2} = \left(\frac{T_0}{T_n}\right)^2 \quad (2)$$

式中:  $E_{rd}$  为相对动弹性模量;  $E_{dn}$  为经历第  $n$  个冻融循环后试件的动弹性模量;  $E_{d0}$  为未进行冻融试验试件初始的动弹性模量;  $V_n$  为经历第  $n$  个冻融循环后试件的表面波速度;  $V_0$  为未进行冻融试验试件初始表面波速度;  $T_0$  为未进行冻融试验测得的试件初始声波声时;  $T_n$  为经历第  $n$  个冻融循环后测得试件的声波声时。

试验采用 NM-4B 型非金属超声检测仪, 测出超声波在经历不同冻融循环作用后的混凝土试件内部的传播声时值  $T$ , 通过式(2)可得混凝土试块的相对动弹性模量  $E_{rd}$ 。每个小循环结束后, 对试件的声时值进行检测, 从而得出试件相对动弹性模量与冻融次数的变化关系, 如图2所示。

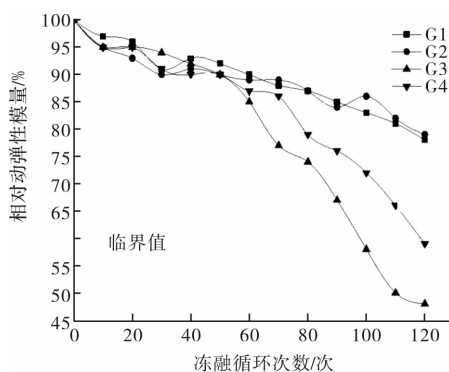


图2 试件相对动弹性模量与冻融循环次数关系

Fig. 2 Relationships between relative dynamic elastic modulus and freezing-thawing cycle number

由图2可以看出, 随着冻融循环次数的增加各

组混凝土试件的相对动弹性模量均有一定的下降。在前60次冻融循环中, 四组试件的相对动弹性模量变化趋势基本一致。60次冻融循环后, G3、G4组试件的相对动弹性模量相比G1、G2组有着明显的加速衰减趋势。其中G2标准养护组和G3自然养护组试件的材料配合比和试验条件均相同, 但自然养护条件的G3组试件相对动弹性模量的变化趋势(抗冻性能)明显大于G2组试件, 随着冻融循环次数的增加, G3组试件的动弹性模量下降非常明显, 经历100次冻融循环后其相对动弹性模量已经低至58%, 并低于试验终止条件值60%。另外, 标准养护、相同配合比的G2、G4组试验件, 掺加钢纤维的G2组试件抗冻性能要优于未掺钢纤维的G4组试件。G2组试件在整个冻融循环过程中, 相对动弹性模量有较小程度的离散变化现象, 这是受该组试验件中个别试块骨料的不均匀性影响所致, 但总的来看, 随着冻融循环次数的增加该组混凝土试件的相对动弹性模量呈现出明显的下降趋势, 说明混凝土内部结构出现了劣化。

以上试验结果表明: 该几种混凝土材料在-55~74℃的极端温度环境下, 养护方式的不同对混凝土的抗冻性能有着显著的影响, 标准养护的试件优于自然养护的; 掺加钢纤维对提高混凝土的抗冻性有着显著的提高。

### 2.2 冻融作用与混凝土试件质量损失率之间的变化关系

混凝土试件在冻融循环过程中的质量变化主要由两部分组成: 一部分是混凝土试件表面的浆体、骨料的剥落导致质量的下降; 另一部分则是在冻融循环试验过程中, 随着冻融循环次数的增加, 混凝土试件内部出现劣化逐渐产生微裂缝, 在饱水状态下裂缝吸水饱和, 导致试件重量的增加。混凝土试件的质量损失率  $W_n$  可由式(3)得出:

$$W_n = (1 - G_n/G_0) \times 100\% \quad (3)$$

其中:  $G_0$  为冻融试验前混凝土试件初始质量,  $G_n$  为经历  $n$  次冻融循环后混凝土的质量。

在120次冻融循环试验过程中, 每经历10次循环, 对试件的质量进行一次测量, 得到了试件质量损失率与冻融循环次数之间的关系, 如图3。

试验过程中, 试件表面均未出现明显的表面骨料剥落现象, 因此试件质量的变化主要反应了试件内部的裂缝吸水而引起。从图3可以看出, 经历120次冻融循环后, 4组试件的质量出现了不同

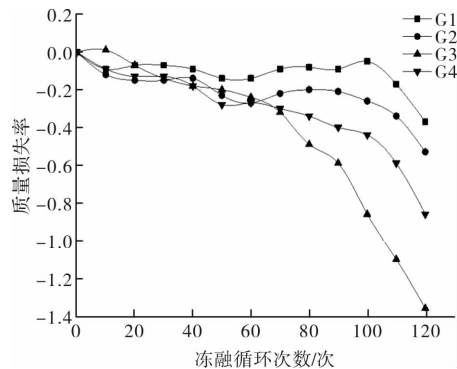


图3 试件质量损失率与冻融循环次数关系

Fig. 3 Relationships between mass loss ratio and freezing-thawing cycle number

程度的增加. 随着冻融循环次数的增加, 试件内部的冻害慢慢累积, 逐渐形成贯通的、较大的微裂缝, 从而积蓄了更多的自由水, 导致质量的增加. 由以上实验结果可得出: 经历 120 次冻融循环, 4 组试件的抗剥落能力都比较强, 试件最大质量增加率不到 1.5%, 但标准养护且掺加钢纤维的 G1 组试件的抗冻裂能力明显优于其他三组试验件.

### 2.3 冻融作用下混凝土抗压强度的劣化规律

抗压强度是混凝土最重要的力学性能, 因为强度与硬化水泥石、骨料和水泥的界面区以及孔隙等直接相关. 在 120 次冻融循环试验过程中, 每 10 次冻融循环对试件的抗压强度进行了测试, 得到了试件抗压强度损失率与冻融次数的变化关系, 如图 4 所示.

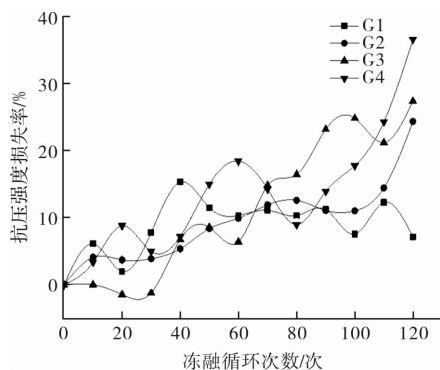


图4 试件抗压强度损失率与冻融循环次数关系

Fig. 4 Relationships between compressive strength loss ratio and freezing-thawing cycle number

从图 4 实验结果可看出, 各组试件的抗压强度表现出较为明显的离散特征, 这和混凝土骨料的均匀程度有关, 个别试块骨料混合不是十分均匀导致强度测试时平均值有一定的波动现象. 但是总体上每组的抗压强度损失率整体上呈现出上升的趋势. 经历 120 次冻融循环, 四组混凝土试件的抗压性能大小依次为  $G1 > G2 \approx G3 > G4$ , 标准养护、

掺钢纤维的 G1 组试件的抗压强度损失率最小, 抗压性能表现最佳, 其次为 G2 与 G3 组试件, G4 组试件抗压性能一般, 且不稳定, 随着冻融次数的增加抗压强度损失较大.

### 2.4 冻融作用下混凝土抗折强度的劣化规律

在 120 次冻融循环试验过程中, 每经历 10 次试验后, 对试件的抗折强度进行了测试, 得到了试件抗折强度损失率与冻融次数的变化关系, 如图 5 所示.

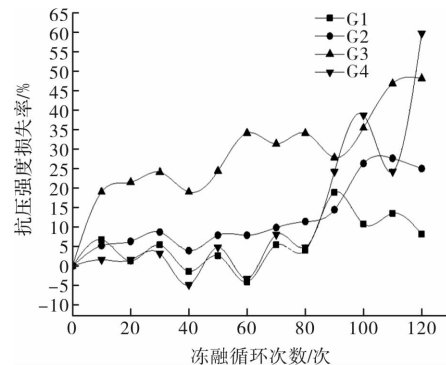


图5 试件抗折强度损失率与冻融循环次数关系

Fig. 5 Relationships between flexural strength loss ratio and freezing-thawing cycle number

从图 5 实验结果可以看出, 随着冻融循环次数的增加, 四组试件的抗折强度损失率呈增加趋势, 即试件的抗折性能随冻融循环次数的增加出现衰减趋势. 其中 G1 组试件的抗折性能受冻融影响变化较小, 抗折性能较好. 自然养护的 G3 组试件受冻融循环影响较大. 经历 80 次冻融循环后, 没掺加钢纤维的 G4 组试验件抗折损失率出现突增现象, 抗折性能恶化衰退, 原因是 G4 组试件未掺加增强试件阻裂、增韧作用的钢纤维, 随着冻融循环次数的增加, 内部裂缝逐渐拓展、损伤逐渐累积, 混凝土的韧性迅速下降.

## 3 结论

通过对四组混凝土试件在  $-55 \sim 74^\circ\text{C}$  温度环境下的耐久性的试验研究分析, 得出了极端环境温度冻融循环对混凝土试件耐久性的影响, 结论如下:

(1) 经 60 次冻融循环后, 自然养护组试件和标准养护且未添加钢纤维组试件的冻融特性参数相对动弹模量、质量损失率均出现了明显的衰减. 抗压强度和抗折强度特性方面, 标准养护和添加钢纤维组试件受极端温度冻融循环的影响程度均小于自然养护组和标准养护且未添加钢纤维组试件.

所以,标准养护条件和添加钢纤维对混凝土极端冻融环境下的耐久性有一定增强作用;

(2)随着极端冻融循环次数的增加,四组试件的冻融特性指标均出现了下降.较之自然养护组试件,标准养护组混凝土试件的冻融特性明显好于自然养护组试件.可见,对于同等级混凝土,标准养护对混凝土极端环境下的冻融特性有明显的增强作用;

(3)对于同等级的G40混凝土,相同标准养护条件,添加钢纤维对混凝土极端环境下冻融特性有明显的增强作用.

## 参考文献 References

- [1] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性[M].北京:科学出版社,2002.  
JIN Weiliang, ZHAO Yuxi. Durability of concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [2] 牛荻涛.混凝土结构耐久性与寿命预测[M].北京:科学出版社,2003.  
NIU Ditao. Durability and life prediction of concrete structures [M]. Beijing: Science Press. 2003.
- [3] 牛荻涛,肖前慧.混凝土冻融损伤特性分析及寿命预测[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2010,42(3):319-322.  
NIU Ditao, XIAO Qianhui. Analysis of cumulative damage characteristics and life prediction for the concrete in freezing-thawing circumstance[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2010, 42(3):319-321.
- [4] 施士升.冻融循环对混凝土力学性能的影响[J].土木工程学报,1997,30(4):35-42.  
SHI Shisheng. Effect of freezing thawing cycles on mechanical properties of concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(4):35-42.
- [5] 覃耐坤,宋玉普,王玉杰,等.冻融循环对海水中混凝土抗压性能的影响[J].混凝土,2004(1):16-18.  
QIN Likun, SONG Yupu, WANG Yujie, et al. The influence of cycles of freezing and thawing on the compressive property of concrete in seawater[J]. Concrete, 2004(1):16-18.
- [6] 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]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition). 2006, 38(4):514-517.
- [7] GOKCE A, NAGATAKI S, SAEKI T, et al. Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: the role of air content in demolished concrete[J]. Cement and Concrete Research. 2004, 34(5):799-806.
- [8] PENTTALA V, AL-NESHAWY F. Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(9): 1407-1420.
- [9] 祝金鹏,李术才,刘宪波,等.冻融环境下混凝土力学性能退化模型[J].建筑科学与工程学报,2009,26(1):62-67.  
ZHU Jinpen, LI Shucai, LIU Xianbo, et al. Mechanical property deterioration model for concrete in environment with freezing-thawing[J] Journal of Architecture and Civil Engineering. 2009, 26(1):62-67.
- [10] 李金玉,曹建国,徐文雨,等.混凝土冻融破坏机理的研究[J].水利学报,1999(1):41-49.  
LI Jinyu, CAO Jianguo, XU Wenyu, et al. Study on the mechanism of concrete destruction under frost action [J]. Journal of Hydraulic Engineering Shuili Xue Bao. 1999(1):41-49.
- [11] 金祖权.西部地区严酷环境下混凝土的耐久性与寿命预测[D].南京:东南大学,2006.  
JIN Zuquan. Durability and life prediction of concrete structures in the harsh environment of western region [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [12] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance[J]. Journal of the ACI, 1945, 16(4):245-272.
- [13] POWERS T C, HEIMUTH R A. Theory of volume change in hardened portland cement paste during freezing[J]. Proc. Highway Research Board, 1953, (32): 85-21.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082-2009. [S].北京:中国建筑工业出版社,2009.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P R C. Test method standard of long-term behavior of and durability for ordinary concrete: GB/T 50082-2009 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.
- [15] 刘卫东,张东芹,刘胜利,等.超声波检测混凝土结构抗冻性的方法研究[J].无损检测.2002,24(5): 196-199.  
LIU Weidong, ZHANG Dongqin, LIU Shengli, et al. Study on ultrasonic testing of frost resistance of concrete structures [J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(5):196-199.

(编辑 沈波)