

超低温冻融循环作用下的混凝土强度

谢 剑^a, 吴洪海^b

(天津大学 a. 建筑工程学院; b. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 混凝土结构已应用于低温、超低温环境领域, 而当前对超低温下混凝土性能的研究很少, 超低温冻融循环作用下混凝土强度的研究在国内几乎是空白。参照《普通混凝土长期性和耐久性试验方法》, 考虑循环次数、循环时的最低温度、水胶比及外界环境湿度等参数的影响, 进行了立方体混凝土抗压、抗拉强度试验及砂浆残样的 SEM 扫描电镜试验, 探究超低温冻融循环作用对混凝土强度的影响及损伤的微观机理。强度试验结果表明, 较常规冻融循环, 超低温冻融循环对混凝土有更不利的影响, 且随温度的降低, 水胶比的提高, 损伤有加大的趋势; 相应地, SEM 电镜试验下混凝土砂浆孔径增大, 材料变得更疏松, 从机理上解释了强度试验结果的合理性。

关键词: 混凝土; 超低温; 冻融循环; 强度; 微观结构;

中图分类号: TU502

文献标识码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S2-0165-04

Experimental Research on Concrete Strength under Freeze-thaw Recycle Action with Ultra-low Temperature

Xie Jian^a, Wu Hong-ai^b

(a. Tianjin University, Department of Civil Engineering,

b. Key Laboratory Coast Civil Structure Safety, Ministry of Education, 300072 Tianjin, P. R. China)

Abstract: The concrete structure has been used in low and ultra-low temperature environment. But few researches are experienced on its properties under freeze-thaw recycles with ultra-low temperature. Based on the standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete, considering the influence of the times and minimum temperature of recycles, water-cement ratio and the external environment humidity, compressive and tensile strength of cubic concrete and scanning electron microscopy on the residual sample are experimented to explore the impact of freezing and thawing cycles under ultra-low temperature on its strength and microstructure. The results show that the role of cryogenic temperature for freeze-thaw cycles has a greater effect on concrete performance. With the temperature decreasing and water-cement ratio increasing, the damage tends to grow up. Consistent with the results of the strength tests, electron microscopy tests show that the pore size of mortar increases and the material becomes looser.

Key words: concrete; ultra-low temperature; freeze-thaw cycles; strength; microstructure.

随着中国对 LNG 和 LPG 产业的发展越来越重视、西部大开发战略和东北老工业基地振兴计划的实施、海洋环境下的浮动码头建设的开展, 低温深冷环境下的土木工程建设正在兴起。混凝土、预应力混凝土结构的设计建设已步入一个新的高度和领域, 也不可避免遇到一系列新问题, 超低温冻融循环作用对混凝土的影响便是其中之一。

国内, 冻融循环对混凝土影响仅作为一个耐久性课题, 大多集中于常温到 -30℃ 左右的循环作用^[1-6], 由于受到工程背景、技术设备条件的限制, 超低温冻融循环下混凝土性能研究几乎是空白; 国外, 欧美、日本等几个发达国家通过一系列试验研究已取得了大量研究成果: 美国学者 Monfor 提出, 饱和硅酸盐水泥混凝土经 12 次冻融循环, 在最低温度为 -30℃、-70℃、-170℃ 时抗压强度分别降低 50%、60% 和 55%, 抗拉强度降低 60%、70% 和 70%, 常温 ~ -70℃ 的

循环作用对混凝土损伤最大^[7-8]。文献[9]中提到, 20℃ ~ -196℃ 冻融循环 3 次, 混凝土抗压强度降低 50%, 弹性模量降低 90%。文献[8-11]中提到, 随着冻融次数的增多、循环时最低温度的降低、水胶比的提高、环境含水量的增大, 冻融损伤的程度越严重, 而含气量的增加对抗冻性是有利的。此外降温速率对冻融损伤的程度也有较大的影响, 降温速率提高会加重损伤的程度, 降温速率降低 70% 时, 混凝土的损伤程度明显降低^[11-13]。

由于地理条件、试验条件差异等原因, 国外的研究资料不能直接用于国内低温混凝土的设计与应用。本试验利用低温冰箱和超低温液氮环境箱实现了常温到 -180℃ 范围内快速降温, 通过对比不同强度等级的混凝土强度冻融前后外观变化、强度损失及 SEM 电镜下混凝土材料微观结构的变化, 以研究超低温冻融循环作用对混凝土性能的影响程度及

冻融损伤的机理,并与已有研究成果进行对比分析。

1 试件设计和试验方法

1.1 试件设计

本试验水泥采用天津水泥实业公司生产的 P. O. 42.5 级水泥,细骨料为中砂,粗骨料为连续级配的碎石,最大粒径为 25 mm。试块尺寸均为 $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$,试验参数包括冻融循环次数、循环时的最低温度、水胶比及外界环境的湿度,共设计 24 组试件,每组 3 个,主要观察冻融循环前后混凝土外观变化,量测其抗压和劈裂强度,并收集残样,在 SEM 扫描电镜下观察其微观结构的变化,进而以探究超低温冻融循环作用对混凝土强度的损伤机理。试件的施工配合比见表 1,其中 C60 混凝土加入高效减水剂, 1 m^3 混凝土掺量为 1.6 kg。

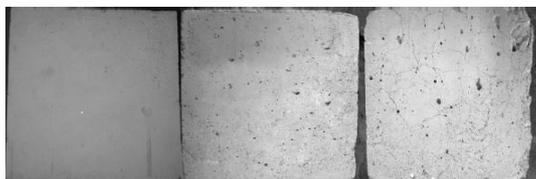
表 1 1 m^3 混凝土的施工配合比

强度	水/kg	水泥/kg	砂/kg	石/kg	水胶比
C30	199.3	407.3	587.2	1256.2	0.489
C40	199.3	498.2	491.4	1261.1	0.400
C60	140	569	487	1254	0.246

1.2 降温及回温

试验采用低温冰箱和超低温液氮环境箱两种降温设备。 $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,采用冰箱降温; $-80 \text{ }^\circ\text{C} \sim -180 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,为提高降温效率,采用液氮物理降温,降温过程中,定时监测试块的温度。测温设备为铂金温度传感器,其预先埋入混凝土试块中央,并通过 LU-906M 智能调节仪显示^[14]。

参照《普通混凝土长期性和耐久性试验方法》GB/T 50082—2009,试验前,混凝土试块浸泡水中 4 d,擦干降温;降到设定温度后,将试块泡入水中回温 48 h,回温时保证水面至少没入试块上表面 20 mm。为考虑环境湿度的影响,部分试块采用自然回温。试验过程中发现,10 次冻融循环作用后,C30 试块混凝土边角砂浆脱落,骨料外露,表面产生了很多裂纹,且其受到的损伤有随温度的降低而加大的趋势,如图 1 所示。



(a) 未经历冻融 (b) 常温~-40°C (c) 常温~-80°C

图 1 C30 混凝土冻融 10 次前后表面对比

2 试验结果和分析

2.1 混凝土强度的影响

试验参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081—2002,在天津大学建材实验室进行。冻融循环作用后,试件强度离散性变大,分析认为,超低温冻融循环作用将放大混凝土初始缺陷,对于初始缺陷较多的试件,水分迁徙和冻胀时将产生更大的损伤,从而在较少的循环次数下产生更大的破坏作用(见表 2)。

表 2 各组试件实测强度平均值强度

试件强度	试验类别	循环次数	冻融循环温度	回温方式	强度平均值
C30	抗压	0	未冻融	泡水回温	29.7
		10	常温~-40°C	泡水回温	26.2
		10	常温~-80°C	泡水回温	21.9
	劈裂	0	未冻融	泡水回温	1.7
		10	常温~-40°C	泡水回温	1.7
		10	常温~-80°C	泡水回温	1.0
C40	抗压	0	未冻融	泡水回温	49.2
		10	常温~-40°C	泡水回温	42.7
		10	常温~-80°C	泡水回温	38.9
	3	3	常温~-120°C	泡水回温	47.6
		3	常温~-160°C	泡水回温	44.7
		3	常温~-160°C	泡水回温	46.7
C60	抗压	0	未冻融	泡水回温	51.0
		10	常温~-40°C	泡水回温	53.3
		10	常温~-80°C	泡水回温	54.5
	3	3	常温~-120°C	泡水回温	57.8
		3	常温~-160°C	泡水回温	46.7
		3	常温~-160°C	泡水回温	46.7
C60	劈裂	0	未冻融	泡水回温	2.4
		10	常温~-40°C	泡水回温	1.7
		10	常温~-80°C	泡水回温	1.6
	3	3	常温~-120°C	泡水回温	3.2
		3	常温~-160°C	泡水回温	3.2
		3	常温~-160°C	泡水回温	2.8

从图 2 中可以看出,10 次循环作用下,C30 混凝土抗压强度在 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ 分别降低 11.8%、26.3%;C40 混凝土在 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ 抗压强度分别降低 13.2%、20.9%。与常规的常温~-40°C 的冻融循环相比,常温~-80°C 时损伤作用要增加 1 倍甚至更高,且冻融循环作用产生的损伤有随着温度降低而加大的趋势,超低温冻融循环对混凝土的影响不容忽视。

相对于抗压强度,冻融循环作用对抗拉强度影响更大,常温~-80°C 冻融循环,C30、C40、C60 混凝土抗拉强度分别降低 41.2%、29.2%、9.4%,是相同条件混凝土抗压强度损失率的 1.5 倍。可见,冻融循环作用下,对混凝土孔径结构分布和内部缺陷更敏感的抗拉强度受到的不利影响更严重。

超低温 $-120 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-160 \text{ }^\circ\text{C}$ 的试验组,试验仅做 3 次循环。从图 3 中可以发现,与低温下的冻融循环作用相似,超低温冻融循环作用对抗拉强度影响更大。常温~-120°C, C40 混凝土抗拉强度降低 33%,而对抗压强度的影响较小,仅为 9.4%。分析认为,液氮降温速率快,尤其是降温过程中,混凝土材料由外向内会产生很大的温度梯度,从而引起很大的温度应力,在循环次数较少的情况下,损伤主要来源于快速降温和回温所产生的温度应力。

从图 2 和图 3 中,可以看出,在相同的条件下,混凝土的强度损失随强度等级的提高而减小。尤其是 C60 混凝土,试件水胶比小,且添加了高效减水剂,经较少次数循环后,强度变化不大,抗拉强度甚至略有提高。这是因为混凝土强度等级越高,水胶比越小,水泥基材料硬化和混凝土养护过程中所产生的缺陷越少,相应地,冻融循环作用下外界环境中水分向内迁徙和冻胀作用所产生的损伤也会大大减弱。

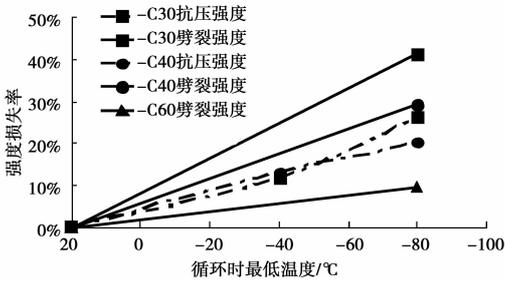


图 2 10 次循环混凝土强度与循环时最低温度关系

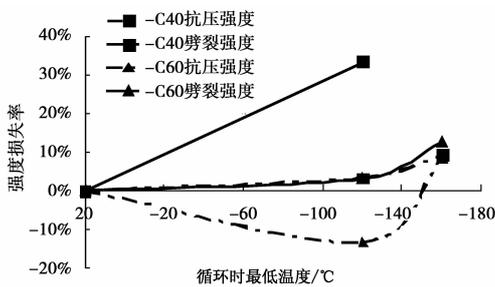


图 3 3 次循环混凝土强度与循环时最低温度关系

2.2 混凝土微观结构影响

SEM 扫描电镜试验可以从微观结构层面解释超低温冻融循环作用损伤机理。作为一种疏松多孔材料,混凝土抗拉强度较低。降温过程中,随着温度的降低,尤其是到 $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,混凝土材料中内部自由水、吸附水和部分小孔径毛细水冻结膨胀,挤压孔壁使混凝土产生细微裂缝;回温融化后裂缝不会闭合,作为一种缺陷存在。随着循环次数的增多,混凝土砂浆孔径逐渐增大,裂缝将不断深入,进一步为外界环境水分的迁徙和下一步更大的冻胀作用提供了更有利的条件,从而加剧混凝土破坏过程。同时,超低温冻融循环常伴随着较高降温速率所产生的温度应力,使混凝土受力更为复杂,在多应力场作用下加速破坏进程。

以上多因素的综合作用造成其强度、弹性模量的降低,直至表面开裂、边角剥蚀脱落等宏观现象,而微观结构特别是孔径分布的变化是混凝土强度、质量等宏观量值改变的根本原因^[15-16]。SEM 电镜试验试样取自各组试块强度试验后残样,以下是各混凝土砂浆试样经过表面喷金处理后,在 5000 倍 SEM 电镜下的微观形态。

分析图 4 和图 5 可知,与冻融前或常温 $\sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻融作用相比,C30、C40 混凝土在常温 $\sim -80\text{ }^{\circ}\text{C}$,C40 试块在常温 $\sim -160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻融循环作用下,水泥水化而成的凝胶产物均呈现出丝状,在若干次水分冻胀作用后凝胶被撕扯的痕迹随着循环时最低温度的下降变得更为明显;相应地,混凝土材料孔径结构均发生了明显的变化,原有的独立分布小孔在

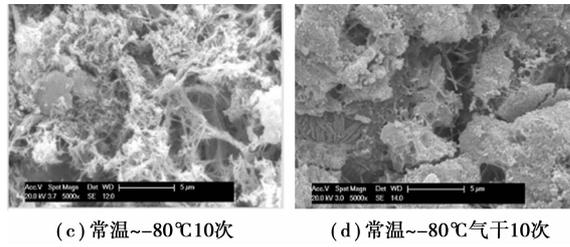
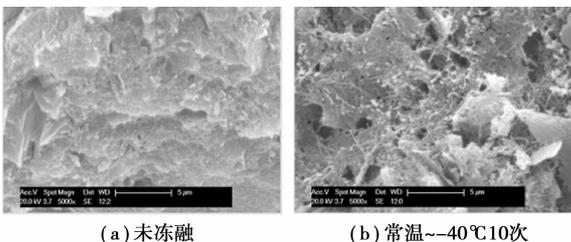


图 4 C30 混凝土冻融前后的微观结构对比

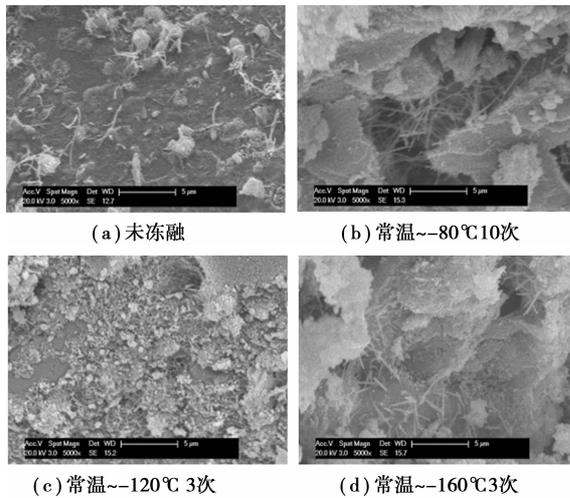


图 5 C40 混凝土冻融前后微观结构对比

冻融循环后,逐渐贯穿、连通,形成了更大的孔径,继而逐渐演变成毛细孔。而宏观上则表现为材料逐渐疏松,缺陷加大,质量减小等,从而造成其抗压、抗拉强度的降低。

分析图 6 可知,相比 C30 和 C40 混凝土,水胶比小且添加了高效减水剂的 C60 混凝土,由于其抗拉强度较高且试件存在的初始缺陷少,因此冻融循环过程中水分的迁徙会受到很大的抑制,经历相同条件和相同次数的冻融作用后,混凝土砂浆表面仍然很致密,孔径结构分布与冻融前变化不大。

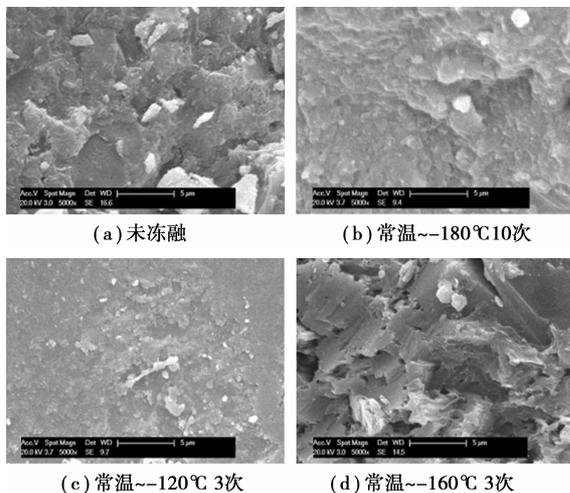


图 6 C60 混凝土冻融前后微观结构对比

此外对比自然回温的 C30 混凝土,泡水回温后混凝土孔径变化更明显。可见外界环境的湿度对冻融循环作用下混

凝土的性能也有较大的影响。

综合冻融循环前后混凝土的外观变化情况及各组混凝土强度试验和 SEM 扫描电镜的试验结果,可以得出:超低温冻融循环作用下,随着冻融次数的增加、循环时最低温度下降、水胶比及使用环境中含水量的增大,混凝土损伤作用有加大的趋势。这与文献[17]中提出的结论是相符的。

3 结论

1)较常规冻融循环,超低温冻融循环损伤作用更大,一80℃时大约增加1倍,且损伤程度有随温度的降低而加重的趋势。

2)超低温冻融循环对低标号、水胶比较大、初始缺陷较多的C30、C40混凝土损伤作用较大;在循环次数较少的情况下,对高标号C60混凝土影响相对较小。

3)较抗压强度或使用环境湿度不大的混凝土结构,超低温冻融循环对混凝土抗拉强度和含水量较大的结构的影响更为显著。

4)环境中或对开裂及防渗有特殊要求的结构,有必要采取更严格的措施削弱超低温冻融循环作用的不利影响。

参考文献:

- [1] 周志云, 孙敏, 吕礼春. 混凝土冻融变形的试验研究[J]. 混凝土, 2010, (4): 20-27.
Zhou Zhi-yun, Sun Min, Lv Li-chun. Deformations of concrete under different freeze-thaw test conditions [J]. Concrete, 2010, (4): 20-27.
- [2] 冀晓东, 宋玉普. 钢筋与混凝土黏结性能冻融破坏的力学分析[J]. 水力学报, 2009, (12): 1495-1499.
Ji Xiao-dong, Song Pu-yu. Mechanic analysis on the failure of bond behavior between concrete and steel bar when suffered from frost injury[J]. SHUILI XUEBAO.
- [3] 侯文琦, 叶梅新. 青藏铁路钢-混凝土组合结构低温试验研究[J]. 湖南科技大学学报, 2004, (3): 53-54.
Hou Wen-qi, Ye Mei-xin. Study of steel-concrete composite structures of qinghai-tibet railway under low temperature[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2004, (3): 53-54.
- [4] 方永浩, 陈焯, 肖婷. 冻融作用下硬化水泥浆体和混凝土结构的变化[J]. 材料导报, 2007, (4): 157-159.
Fang Yong-hao, Chen Ye, Xiao Ting. Effect of freeze-thaw on the structure of hardened cement paste and concrete[J]. Materials Review, 2007, (4): 157-159.
- [5] 李金平, 盛煜, 丑亚玲. 混凝土冻融破坏研究现状[J]. 路基工程, 2007, (3): 1-3.
Li Jin-ping, Sheng Yu, Chou Ya-ling. Recent studies of concrete to freeze-thaw damage[J]. Subgrade Engineering, 2007, (3): 1-3.
- [6] 冀晓东, 赵宁, 宋玉普. 冻融循环作用后变形钢筋与混凝土黏结性能退化研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(1): 87-91.
Ji Xiao-dong, Zhao Ning, Song Yu-pu. Experimental study on bond behavior's deterioration between deformed steel bar and concrete after freezing and thawing[J]. Industrial Construction, 2010, 40(1): 87-91.
- [7] Lahlou Dahmani, Amar Khenane, Salah Kaci. Behavior of the reinforced concrete at cryogenic temperatures[J]. Cryogenics, 2007, (47): 517-525.
- [8] Takashi, Miura. The properties of concrete at very low temperatures. Materials and structures[J]. 1989, (22): 243-254.
- [9] 山根昭, 赵克志. 超低温混凝土[J]. 低温建筑技术, 1980, (1): 57-60.
Yamane Sho, Zhao Ke-zhi. Concrete under cryogenic low temperature [J]. Low Temperature Architecture Technology, 1980, (1): 57-50.
- [10] Shashank Bioshnoi. Strain variations in concrete subjected to cyclic freezing and thawing, 2004: 1-84.
- [11] G. C. Lee, T. S. Shih, K. C. Chang. Mechanical properties of concrete at low temperature[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1988, (2): 13-24.
- [12] 王传星, 谢剑, 杨建江. 超低温环境下混凝土的性能[J]. 低温建筑技术, 2009, 135(9): 8-10.
Wang Chuan-xing, Xie Jian, Yang Jian-jiang. Properties of concrete under extremely low temperature[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009, 135(9): 8-10.
- [13] F. S. Rostasy, U. Schneider, G. Wiedemann. Behavior of mortar and concrete at extremely low temperatures[J]. Cement and Concrete Research, 1979: 365-376.
- [14] 谢剑, 李会杰, 王传星, 等. 超低温环境下钢筋混凝土力学性能试验研究的进展及展望[A]. 第四届结构工程新进展国际论坛论文集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 88-95.
Xie Jian, Li Hui-jie, Wang Chuan-xing, et al. Research progress and prospects on mechanical properties of concrete at cryogenic temperatures[A]. Proceedings of the Fourth International Forum on Advances in Structural Engineering[C]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 88-95.
- [15] 余红发, 刘俊龙, 张云升, 等. 高性能混凝土微观结构及其高耐久性形成机理[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, (2): 240-243.
Yu Hong-fa, Liu Jun-long, Zhang Yun-sheng, et al. Microstructure and durability forming mechanism of high performance concrete[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, (2): 240-243.
- [16] 苏根达, 钟晓敏. 海水环境下混凝土耐久性研究[J]. 工业建筑, 2008, (5): 63-65.
Su Gen-Da, Zhong Xiao-min. Research on the durability of concrete in marine environment[J]. Industrial Construction, 2008, (5): 63-65.
- [17] 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, (5): 125-129.
Ye Jian-xiong, Chen Yue, Zhang Jing, et al. Experimental analysis of freeze-thaw recycle with ultra-low temperature for cementitious material[J].土木建筑与环境工程, 2010, (5): 125-129.