

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0125-07

超低温冻融循环对混凝土材料性能的影响

魏 强¹, 谢 剑^{1,2}, 吴洪海¹

(1. 天津大学建筑工程学院土木工程系, 天津 300072; 2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 借助低温冰箱和超低温加载箱降温的方式, 考虑不同混凝土等级、不同冻融次数、不同冻融温度及不同含水量等因素, 对 63 个混凝土立方体试块和 21 个钢筋混凝土拔出试件进行了冻融循环。通过对冻融循环后立方体试块的强度试验和拔出试件的拔出试验, 探究了各因素对混凝土强度及钢筋与混凝土黏结强度的影响。此外, 通过对立方体试块残样的 SEM 电镜扫描试验, 揭示了冻融循环对混凝土微观结构的损伤过程及原理。结果表明: 水胶比对冻融后混凝土的强度影响较大, 添加高效减水剂有助于提高混凝土抵抗冻融破坏的能力; 少次数超低温冻融循环对高标号混凝土的强度降低不显著; 与混凝土抗压强度相比, 低温和超低温冻融循环对抗拉强度的降低作用更加明显; SEM 电镜扫描试验有效地解释了混凝土在冻融循环下强度降低的微观机理; 少次数超低温冻融循环对钢筋与混凝土黏结强度的降低作用不容忽视。

关键词: 超低温; 冻融循环; 混凝土; 钢筋; 强度; 黏结性能

中图分类号: TU502 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.04.S013

EXPERIMENTAL ANALYSIS ON PROPERTIES OF CONCRETE AFTER FREEZE-THAW CYCLES UNDER EXTRA-LOW TEMPERATURES

WEI Qiang¹, XIE Jian^{1,2}, WU Hong-hai¹

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the cooling system of a low-temperature refrigerator and an extra-low temperature loading box, the freeze-thaw cycle test was carried out for 63 cube specimens and 21 pull-out specimens under different levels, different cycle times, different temperatures and different water contents. Though the test, the influence factors about the strength of concrete and the bonding strength between reinforcement and concrete were studied. Besides, the SEM test was carried out to reveal the damage of microstructures after the freeze-thaw cycles. The results show that: the strength of concrete after freeze-thaw cycles is affected by the water cement ratio obviously, and adding super plasticizer will improve the resistance ability of freeze-thaw damage; with fewer times of freeze-thaw cycles, the influence of strong concrete is not obvious; there is more reduction in tensile strength after freeze-thaw cycles than that in compressive strength; the test of SEM explains the microscopic mechanism after cycles effectively; the bonding strength between reinforcement and concrete has a significantly reduction after 5 freeze-thaw cycles.

Key words: ultra-low temperatures; freeze-thaw cycles; concrete; reinforcement; strength; bonding properties

随着人们探知和活动的范围越来越广, 钢筋混凝土结构也更多地应用在低温环境中, 而 LNG

(Liquefied Natural Gas)储罐的泄露则会使钢筋混凝土结构面临超低温的问题^[1-3]。国内外的研究表明:

收稿日期: 2012-04-26; 修改日期: 2013-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078260)

通讯作者: 谢 剑(1974—), 男, 河北人, 副教授, 博士, 硕导, 从事混凝土基本理论研究(E-mail: xiejian@tju.edu.cn).

作者简介: 魏 强(1988—), 男, 山东人, 硕士生, 从事低温混凝土结构力学性能试验研究(E-mail: sddzwei@126.com);

吴洪海(1986—), 男, 河北人, 硕士生, 从事低温混凝土结构力学性能试验研究(E-mail: whhai1987@163.com).

超低温下钢筋混凝土的材料强度及结构承载力都有较大的提升^[4-16]。相比之下,关于更不利的超低温冻融循环下混凝土性能的研究则较少。国内外文献表明,超低温冻融循环后,混凝土强度损失严重但损失程度并未获得公认的结果,而对于钢筋与混凝土黏结性能的研究则更少^[7-12,17]。本文通过低温和超低温冻融循环后混凝土的抗压、劈裂试验及拔出试件的拔出试验,主要研究了混凝土等级、冻融温度、循环次数和含水量等因素对混凝土的强度及钢筋与混凝土黏结强度的影响规律,并为超低温冻融下混凝土性能的后续研究提供一定的数据支持。此外,通过 SEM 电镜扫描试验探究了低温和超低温冻融循环对混凝土微观结构的影响机理。

1 超低温冻融循环下的混凝土强度

1.1 试件设计及方案

根据《混凝土结构试验方法标准》(GB50152-92)采用 150mm×150mm×150mm 的标准立方体试块进行低温和超低温冻融循环后抗压和抗拉强度的试验研究。本试验混凝土的设计强度为 C30、C40 和 C60,其中 C60 添加了高效减水剂,配合比见表 1。

表 1 3 种不同设计强度的混凝土试块配合比
Table 1 The mix proportion of different concrete grades

设计强度	水/kg	水泥/kg	砂子/kg	石子/kg
C30	199.3	407.3	587.2	1256.2
C40	199.3	498.2	491.4	1261.1
C60	140	569	487	1254

试验方案参考《普通混凝土长期性和耐久性试验方法》GBJ_82-85 主要考虑了不同混凝土等级、不同冻融温度、不同循环次数和不同含水量对混凝土抗压和抗拉强度的影响。试件的低温冻融次数主要为 10 次,含水量由泡水和气干两种状态控制。超低温冻融方案则参考国内外文献关于超低温对混凝土强度损伤较大的说法,采用 3 次循环^[8-9,12,17]。总计共 63 个试件。另外,为了更好的探究混凝土冻融破坏的微观机理,对强度试验后的混凝土试件残余取样进行 SEM 电镜扫描试验。

1.2 降温设备及温度控制

降温设备见文献[16],在此不再赘述。

为了更好的控制回温,测试了超低温温度块在室温下的回温过程,见图 1 可知在 4h 内试件温度可由-170℃回温至 0℃。泡水方案的混凝土试块在试验前浸泡水中 4d,擦干后降温,降到待定温度后,将试块泡入水中进行回温 48h 以确保能够回温至常

温,回温时保证水面至少没入试块上表面 20mm;气干方案的混凝土试块不泡水直接降温,降到待定温度后,取出并自然回温 48h。此过程为一次冻融循环。根据试验方案的不同,进行不同次数的冻融循环。

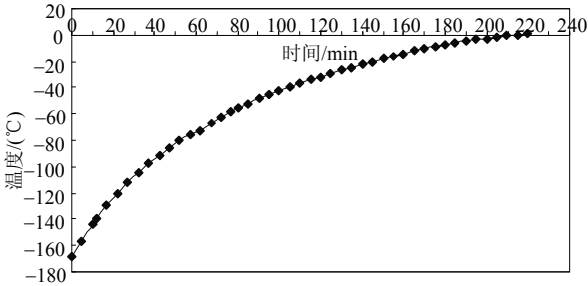


图 1 室温下温度块的回温曲线

Fig.1 The temperature curve of specimen in room temperature

1.3 试验现象与数据

1.3.1 试验现象

3 种强度的混凝土试块中,C30 混凝土试块在冻融循环过程中呈现出最明显的破坏形态,在冻融循环 10 次作用后,试块表面出现了很多的温度裂缝,并且伴有表面砂浆脱落,骨料露出等现象,见图 2。与 C30 混凝土试块相比,C40 试块情况稍好,而 C60 试块无论在低温还是超低温冻融循环下基本没有变化,见图 3。这主要是 C60 混凝土水胶比更小且添加了高效减水剂,内部更致密,对冻融循环抵抗力更高导致。

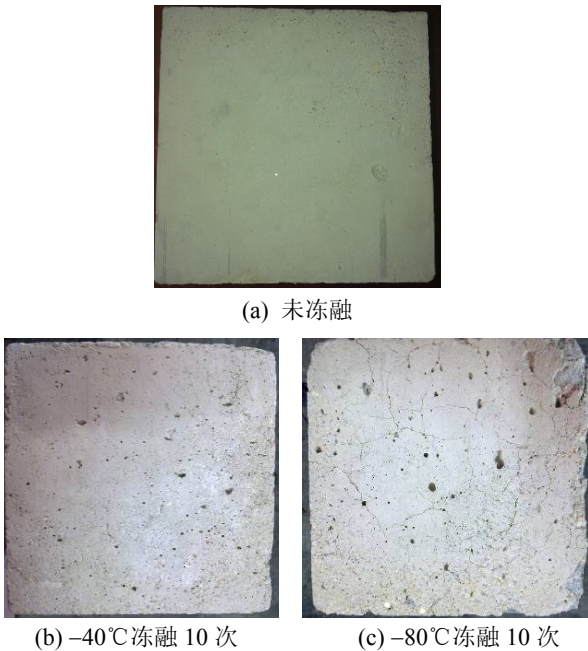
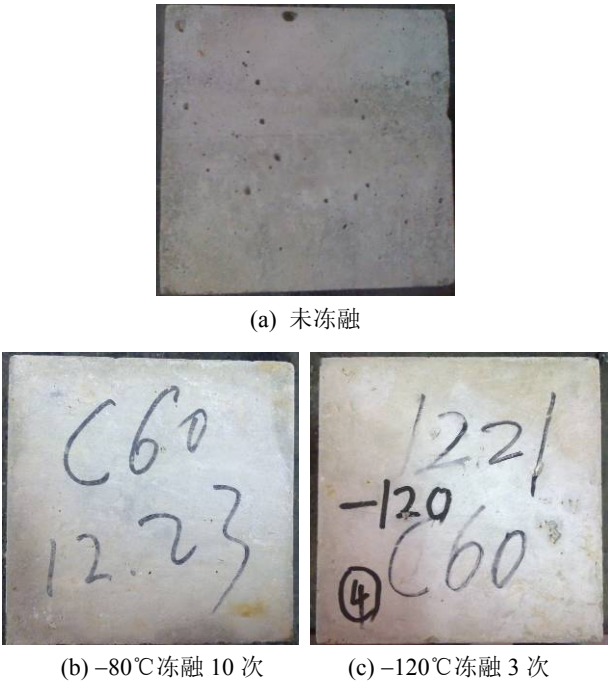


图 2 C30 混凝土表面破坏对比图

Fig.2 Comparison of C30 concrete surface damage



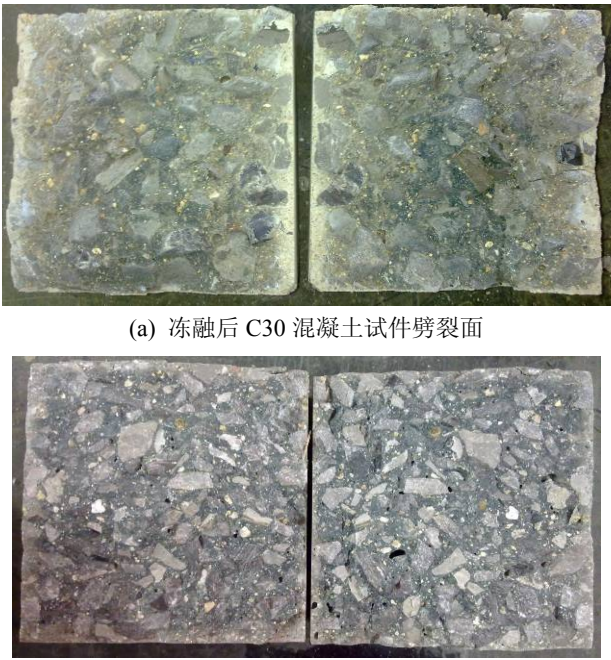
(b) -80℃冻融 10 次 (c) -120℃冻融 3 次
图 3 C60 混凝土表面破坏对比图

Fig.3 Comparison of C60 concrete surface damage

劈裂试验时, C30 混凝土试块在冻融后的劈裂面颜色为淡青色, 质地疏松, 骨料基本没有发生劈裂现象, 并在劈裂面形成不规则的凹坑和凸起; C60 混凝土试块冻融后的劈裂面颜色为深青色, 质地致密, 并且非常平整, 骨料大部分发生劈裂, 见图 4。

1.3.2 试验数据及分析

由表 2 可得, 在泡水条件-40℃和-80℃冻融循环 10 次的情况下, C30 混凝土的抗压强度分别降低 12%和 26%, 抗拉强度最大降低 41%; C40 混凝土



(b) 冻融后 C60 混凝土试件劈裂面

图 4 劈裂面对比图

Fig.4 Comparison of split surface

的抗压强度分别降低 13%和 21%, 抗拉强度最大降低 29%; C60 混凝土的抗压强度则没有降低, 其抗拉强度最大降低 9%。由此可见, 随着水胶比的减少, 冻融循环对混凝土强度的降低作用逐渐降低。气干的 C30 混凝土在-80℃冻融 10 次后, 其抗压强度没有降低, 这主要是试验周期较长, 该组试件强度有所增长导致的。在-120℃和-160℃的超低温 3 次冻融循环下, C40 混凝土的抗压强度降低幅度很

表 2 冻融后混凝土试块强度试验特征值

Table 2 Strength characteristic value of concrete test block after freezing and thawing

设计标号	冻融 最低温度/(℃)	循环 次数	抗压 强度/MPa	抗压强度 相对值	抗拉 强度/MPa	抗拉强度 相对值	试验 方法
C30	20	无	29.7	1.00	1.7	1.00	标准块
	-40	10	26.2	0.88	1.7	1.00	泡水
	-80	10	34.2	1.15	/	/	气干
	-80	10	21.9	0.74	1.0	0.59	泡水
C40	20	无	49.2	1.00	2.4	1.00	标准块
	-40	10	42.7	0.87	/	/	泡水
	-80	10	38.9	0.79	1.7	0.71	泡水
	-120	3	47.6	0.97	1.6	0.67	泡水
	-160	3	44.7	0.91	/	/	泡水
C60	20	无	51.8	1.00	3.2	1.00	标准块
	-40	10	53.3	1.03	3.2	1.00	泡水
	-80	10	54.5	1.05	2.9	0.91	泡水
	-120	3	57.8	1.12	3.3	1.03	泡水
	-160	3	46.7	0.90	2.8	0.88	泡水
C60	20	无	74.0	1.00	/	/	标准块
	-80	10	72.0	0.97	/	/	气干

小,最大为 9%,抗拉强度最大降低 33%;C60 混凝土的抗压强度基本没有降低,抗拉强度最大降低 12%。可见,在超低温的少次数冻融下,混凝土强度的降低程度远远不如国外文献所讲,这主要是混凝土的等级、配合比不同等因素综合作用的结果。

混凝土的抗拉强度降低程度一般要大于抗压强度,这主要是因为混凝土结构经过冻融后,其内的孔隙水会结冰膨胀导致混凝土内部出现裂缝,而该裂缝对抗拉强度削弱作用更大。

1.3.3 SEM 电镜扫描试验及分析

图 5~图 7 是不同等级、不同循环次数、不同循环温度和不同含水量下的试件砂浆残余的 5000 倍

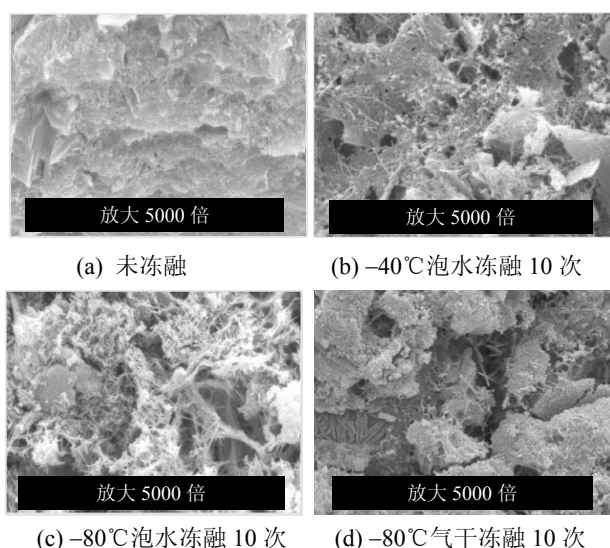


图 5 C30 混凝土冻融前后的微观结构对比

Fig.5 Microstructure comparison of C30 concrete before and after freezing and thawing

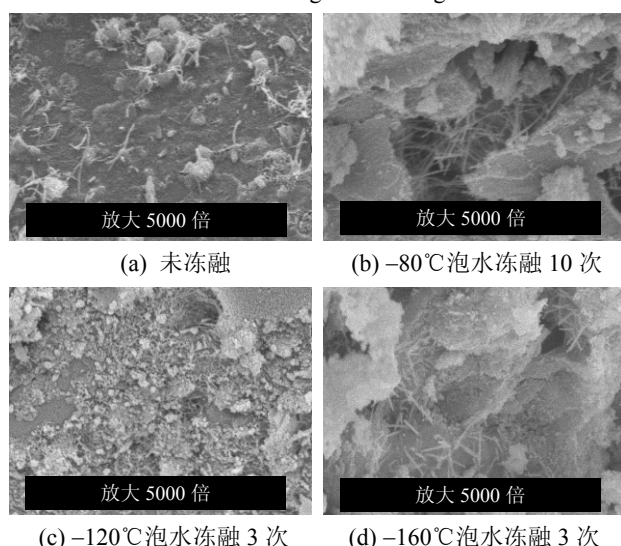


图 6 C40 混凝土冻融前后微观结构对比

Fig.6 Microstructure comparison of C40 concrete before and after freezing and thawing

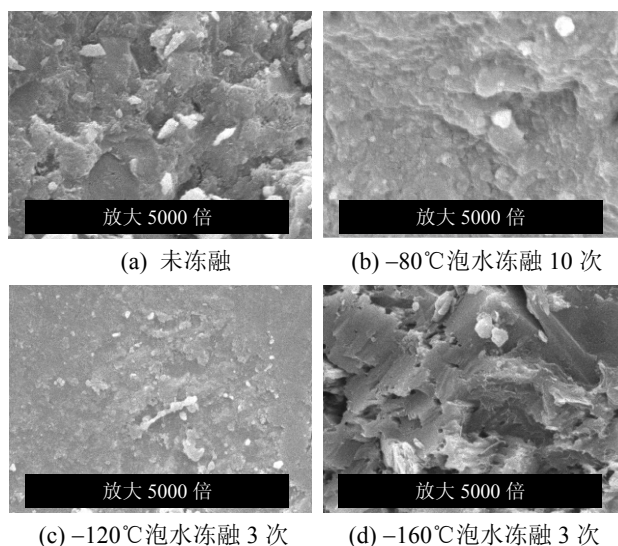


图 7 C60 混凝土冻融前后微观结构对比

Fig.7 Microstructure comparison of C60 concrete before and after freezing and thawing

SEM 电镜扫描照片。由图 5 和图 6 可知,在常温未冻融的状态下,C30 混凝土的微观结构存在更多的孔隙,质地也更加疏松,这也从机理上说明了其冻融破坏最严重的原因。

C30 混凝土泡水状态下,在 -40°C 冻融 10 次后,其微观孔隙存在贯通、增大的情况,质地更加疏松,并且砂浆出现了丝絮化形态;在 -80°C 下,其砂浆丝絮化更加严重,孔隙数量及直径继续增大。C30 混凝土在气干状态 -80°C 冻融 10 次后,其孔隙有所增大,但砂浆还未出现大量的丝絮形态。C40 混凝土在泡水状态下 -80°C 循环 10 次后,其孔隙有所增大,砂浆出现大量的丝絮化形态,但不如 C30 明显;在 -120°C 冻融 3 次后砂浆表面出现碎屑;在 -160°C 冻融 3 次下,砂浆出现少量的丝絮化形态。C60 混凝土砂浆微观结构则基本没有变化。

通过 SEM 电镜扫描试验,确定了在不同混凝土等级、不同温度及循环次数等因素影响下混凝土的微观结构变化情况,充分解释了冻融循环下混凝土强度的变化原因。

2 超低温冻融循环下的钢筋与混凝土黏结强度

2.1 试件设计及方案

根据《混凝土结构试验方法标准》(GB50152-92)及实验室的实际情况,采用中心拔出试件研究钢筋与混凝土的黏结性能。本试验共分为 7 组,每组 3 个试件,试件尺寸为 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 150\text{mm}$,另预留了 6 块标准试块用以测试混凝土抗压强度。

图 8 为试件的几何尺寸。

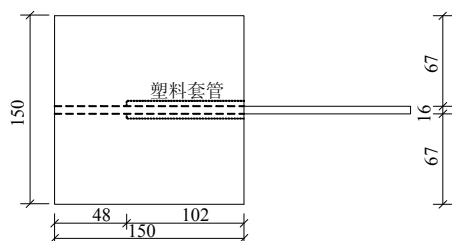


图 8 试件几何尺寸 /mm

Fig.8 Geometry size of specimen

各组试件混凝土的强度设计等级为 C50，混凝土的配合比为水：水泥：砂：石=180：500：619.5：1150.5，实测强度为 53.5MPa。采用直径为 16mm 的 HRB400 级变形钢筋，屈服强度为 452MPa，极限强度为 644MPa，断后伸长率为 22%。

2.2 降温设备和冻融温度控制

降温设备及温度测量方式如前所述。

试件以气干的状态从室温下开始降温，降至冻融设定的最低温度后，取出并自然回温。其试验方案见表 3。

表 3 冻融后拔出试验方案

Table 3 Pull-out test scheme after freezing and thawing

分组	冻融最低温度/(℃)	冻融次数	试件数量
第 1 组	无	无	3
第 2 组	-40	3	3
第 3 组	-80	3	3
第 4 组	-80	5	3
第 5 组	-120	3	3
第 6 组	-120	5	3
第 7 组	-165	3	3

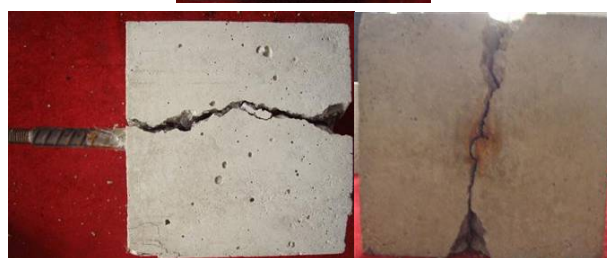
2.3 试验现象及数据

2.3.1 试验现象

经过了多次冻融循环后，试块表面出现不同程度的温度裂缝。随着循环设定温度的降低，温度裂缝有所增加，但不同试件具体情况有所不同。冻融后试件的拔出试验在天津大学结构试验室进行。试验中，绝大多数试块发生劈裂破坏，只有在第 2 组和第 7 组各有一块发生拔出破坏。这主要与混凝土试验的离散特点有关。破坏形式见图 9。



(a) 拔出破坏



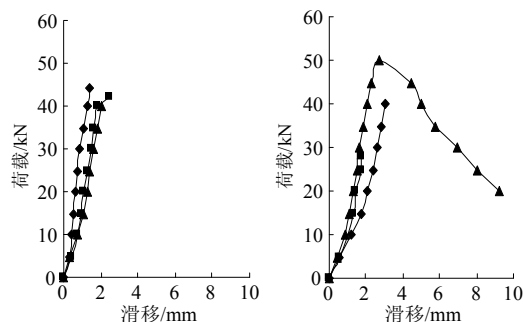
(b) 劈裂破坏

图 9 试件破坏形式

Fig.9 Specimen damage form

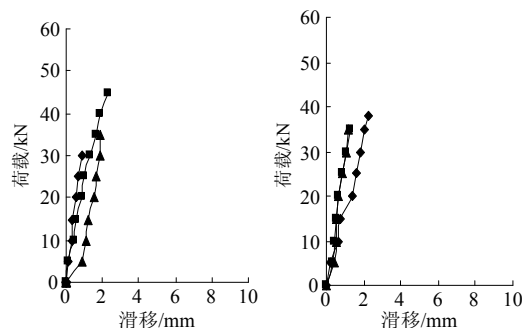
2.3.2 试验数据及分析

通过试验建立了各组试块的荷载-滑移曲线，但各组滑移曲线的趋势大致相同，其荷载-滑移曲线见图 10，其中滑移量为试块加载端的平均滑移。



(a) 第 1 组

(b) 第 2 组



(c) 第 3 组

(d) 第 4 组

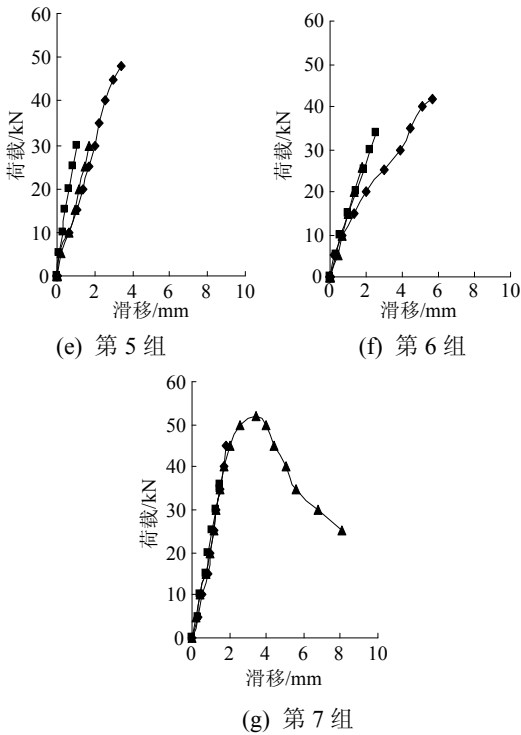


图 10 拔出试件的荷载-滑移曲线
Fig.10 Load-slip curve of pull-out specimens

各组试件的黏结强度特征值见表 4。由表 4 可知，在-120℃冻融循环 5 次的情况下，钢筋与混凝土的黏结强度可以降低 19%，已经不容忽视；各组试件钢筋与混凝土的峰值滑移并不呈现一定的规律性。此外，鉴于钢筋与混凝土黏结性能的敏感度较大，试验中数据显示出较大的离散性，导致第 7 组试件的黏结强度反而有所增大。

表 4 冻融后拔出试件的黏结强度特征值

Table 4 Bond strength characteristic values of pull-out specimens after freezing and thawing

分组	峰值荷载/ 平均黏结强度/ 相对 1 组的黏结强度 平均峰值滑移/			
	kN	MPa	降低系数	mm
第 1 组	42.0	17.41	1.00	1.97
第 2 组	39.3	16.30	0.94	2.51
第 3 组	36.7	15.20	0.87	1.71
第 4 组	36.0	14.92	0.86	1.61
第 5 组	36.0	14.92	0.86	2.06
第 6 组	34.0	14.09	0.81	1.47
第 7 组	44.3	18.37	1.06	2.30

从图 11 中可以看出，3 次循环下在 0~-80℃范围内钢筋与混凝土的黏结强度下降较快，在-80℃~-120℃范围内下降较慢。虽然在 0~-80℃温度段内，混凝土强度降低较少，但钢筋与混凝土的体积变化显著不协调导致其黏结强度较快下降^[1]。5 次循环下，-80℃~-120℃范围内黏结强度下降速度有所增大。由此可见，循环次数增多时，超低温段对黏结

性能降低作用有所增加，这主要是因为循环次数增多，超低温段对混凝土强度的降低更加明显所致。

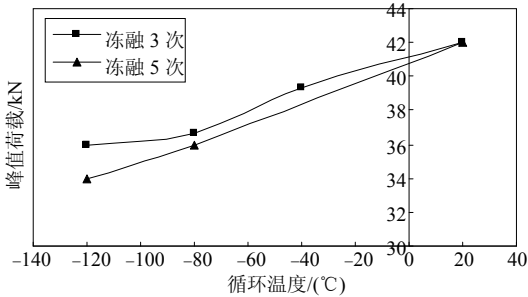


图 11 不同循环温度点下 3 次和 5 次冻融后试件峰值荷载
Fig.11 Peak load of specimens after three times or five times' freeze-thaw at different cyclic temperature

3 结论

- (1) 混凝土强度以及钢筋与混凝土黏结强度都随着超低温冻融温度的降低和冻融次数的增加而逐渐降低，且钢筋与混凝土的黏结强度损失程度要比混凝土强度损失更为严重。
- (2) 含水量较大的混凝土受超低温冻融循环的影响更大，减小含水量可以有效降低混凝土冻融破坏程度。
- (3) 超低温冻融循环对混凝土的破坏程度要比常规冻融严重的多，且抗拉强度损失要超过抗压强度，减小水胶比是提高混凝土抵抗冻融破坏的有效途径。
- (4) 钢筋与混凝土的黏结强度在 0~-80℃温度段内降低较快，在-80~-120℃范围内下降较慢，但在多次超低温冻融下，混凝土强度的降低程度会较大影响其与钢筋的黏结强度。
- (5) SEM 的微观扫描试验解释了冻融循环对混凝土微观结构的影响机理。

参考文献:

[1] 陈锦年, 褚健婷, 许兰英. 南极气候和海冰的时空变化特征及其与太平洋海温场的关系[J]. 海洋学报(中文版), 2003(6): 39—47.
Chen Jinnian, Chu Jianting, Xu Lanying. Spatio-temporal characteristics of antarctic temperature and sea ice and their relationship [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003(6): 39—47. (in Chinese)

[2] 侯文崎, 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, 19(3): 53—57.
Hou Wenqi, Ye Meixin. 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, 19(3): 53—57. (in Chinese)
- [3] 顾安忠. 迎向“十二五”中国 LNG 的新发展[J]. 天然气工业, 2011, 31(6): 1—11.
Gu Anzhong. Outlook of LNG development in the twelfth Five-Year plan of China [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(6): 1—11. (in Chinese)
- [4] Bamforth. The structural permeability of concrete at cryogenic temperatures [D]. Birmingham: University of Aston, 1987.
- [5] 李会杰, 谢剑. 超低温环境下钢筋与混凝土的粘结性能[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊 I): 80—84.
Li Huijie, Xie Jian. Bonding properties between reinforcement and concrete at cryogenic temperatures [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(Suppl I): 80—84. (in Chinese)
- [6] Takashi Miura. The properties of concrete at very low temperatures [J]. Materials and Structures, 1989, 22: 243—254.
- [7] 王传星, 谢剑, 李会杰. 低温环境下混凝土性能的试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊 II): 182—186.
Wang Chuanxing, Xie Jian, Li Huijie. Experimental research on the properties of concrete under low-temperature [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(Suppl II): 182—186. (in Chinese)
- [8] 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, 31(9): 8—10.
Wang Chuanxing, Xie Jian, Yang Jianjiang. Properties of concrete under extremely low temperature [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009, 31(9): 8—10. (in Chinese)
- [9] 山根昭. 超低温混凝土[J]. 低温建筑技术, 1980, 2(1): 57—60.
Shan Genzhao [Japan]. Cryogenic concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 1980, 2(1): 57—60. (in Chinese)
- [10] Vandewalle L. Bond between a reinforcement bar and concrete at normal and cryogenic temperatures [J]. Journal of Materials Science Letters, 1989, 8: 147—149.
- [11] Rostasy F S, Schneider U, Wiedemann G. Behavior of mortar and concrete at extremely low temperatures [J]. Cement and Concrete Research, 1979, 9(3): 365—376.
- [12] Lahlou Dahmani, Amar Khenane, Salah Kaci. Behavior of the reinforced concrete at cryogenic temperatures [J]. Cryogenics, 2007, 47: 517—525.
- [13] 刘爽, 顾祥林, 黄庆华. 超低温下钢筋力学性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(增刊 I): 47—51.
Liu Shuang, Gu Xianglin, Huang Qinghua. Experimental study on mechanical properties of steel bars at super-low temperature [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(Suppl I): 47—51. (in Chinese)
- [14] 刘爽, 黄庆华, 顾祥林. 超低温下钢筋混凝土梁受弯承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(增刊 II): 86—91.
Liu Shuang, Huang Qinghua, Gu Xianglin. Study on bending bearing capacity of reinforced concrete beams at super-low temperature [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(Suppl II): 86—91. (in Chinese)
- [15] Liu Shuang, Gu Xianglin, Huang Qinghua. Experimental study on the bending behavior of reinforced concrete beams under super-low temperature [C]// ASCE. Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. USA: ASCE, 2010: 3537—3544.
- [16] 谢剑, 王传星, 李会杰. 超低温混凝土降温回温曲线的试验研究[J]. 低温建筑技术, 2009, 32(3): 1—3.
Xie Jian, Wang Chuanxing, Li Huijie. Experimental study on the curve of the temperature reduction and comeback in concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2009, 32(3): 1—3. (in Chinese)
- [17] 吴洪海, 谢剑. 超低温冻融循环作用对混凝土性能的影响[C]//《工程力学》杂志社. 第 20 届全国结构工程学术会议论文集(第 I 册). 宁波:《工程力学》杂志社, 2011: 403—406.
Wu Honghai, Xie Jian. Ultra-low temperature freeze-thaw cycle effects on concrete performance [C]// Engineering Mechanics. 20th National Structure Engineering Conference Proceedings (Volume one). Ningbo: Engineering Mechanics, 2011: 403—406. (in Chinese)

(上接第 119 页)

- [11] Yang S, Hu X, Wu Z. Influence of local fracture energy distribution on maximum fracture load of three-point-bending notched concrete beams [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(18): 3289—3299.
- [12] Hillerborg A, Modeer M, Petersson P. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773—782.
- [13] Abdalla H M, Karihaloo B L. A method for constructing the bilinear tension softening diagram of concrete corresponding to its true fracture energy [J]. Magazine of Concrete Research, 2004, 56(10): 597—604.
- [14] Tada H, Paris P C, Irwin G R. The stress analysis of cracks handbook [M]. St. Louis, Missouri: Paris Productions Incorporated, 1985: 1—463.